

บทที่ 3

อุปกรณ์สำหรับสเปกโทรสโกปีเชิงแสง

Instruments for Optical Spectroscopy

สเปกโทรสโกปีเป็นวิชาที่ว่าด้วยการแยกรังสีวิลีเบลออกเป็นความยาวคลื่นช่วงต่าง ๆ ในอดีตใช้สเปกโทรสโกปีอธิบายสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า อุปกรณ์สเปกโทรสโกปีในช่วงวิลีเบลเรียกอุปกรณ์เชิงแสง ปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาช่วงอัลตราไวโอเล็ตและอินฟราเรดก็ยังเรียก อุปกรณ์เชิงแสง แม้ว่าจะไม่ถูกต้องนัก

บทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบของอุปกรณ์เชิงแสงที่ใช้กับเทคนิคสเปกโทรสโกปีตั้งแต่บทที่ 4 ถึง 13 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาเทคนิคสเปกโทรสโกปีที่มีพลังงานมากกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตและพลังงานน้อยกว่ารังสีอินฟราเรด แยกไว้ในบทที่ 14 และ 15

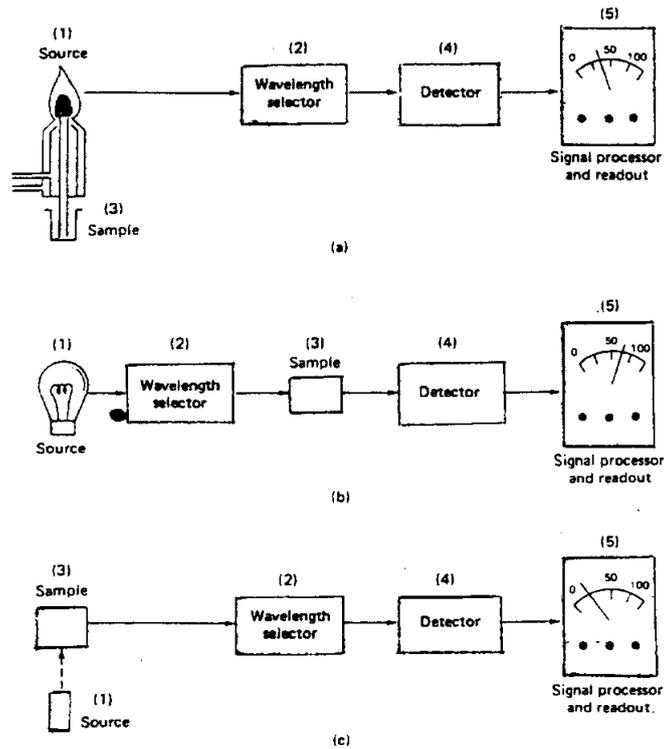
องค์ประกอบและการจัดอุปกรณ์สเปกโทรสโกปีเชิงแสง

Components and Configuration of Instruments for Optical Spectroscopy

วิธีสเปกโทรสโกปีเชิงแสงอาศัยปรากฏการณ์การปล่อย (emission) การดูดกลืน (absorption) การวาวแสง (ฟลูออเรสเซนซ์) การเรืองแสง (ฟอสฟอเรสเซนซ์) และการกระเจิง (scattering) อุปกรณ์สเปกโทรสโกปีมีองค์ประกอบเหมือนกัน ไม่ว่าจะศึกษาสเปกตรัมอัลตราไวโอเล็ต วิลีเบลหรืออินฟราเรด แต่อาจมีการจัดวางองค์ประกอบต่างกัน

องค์ประกอบของเครื่องสเปกโทร

1. แหล่งกำเนิดของพลังงานการแผ่รังสีที่เสถียร
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกช่วงสเปกตรัมที่ต้องการวัด
3. ภาชนะโปร่งใสที่ใช้ใส่สารตัวอย่าง
4. เครื่องตรวจหารังสีหรือแตรนซ์ดีวเซอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานรังสีเป็นสัญญาณที่ใช้ได้ (สัญญาณไฟฟ้า)
5. ที่ควบคุมสัญญาณและระบบอ่านสัญญาณเป็นเข็มวัด กระดาษบันทึกหรือตัวเลข



รูป 3-1 องค์ประกอบของอุปกรณ์สเปกโทรชนิดต่าง ๆ

(a) อิมิสชันสเปกโทรสโกปี

(b) แอ็บซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี

(c) ฟลูออเรสเซนซ์ ฟอสฟอเรสเซนซ์และสแกตเตอริงสเปกโทรสโกปี

รูป 3-1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรทั้งสี่แบบ องค์ประกอบชุดที่สี่และห้าของเครื่องสเปกโทรทั้งสี่แบบจัดวางไว้เหมือนกัน

อิมิสชันสเปกโทรสโกปี (Emission Spectroscopy) ต่างจากเครื่องสเปกโทรทั้งสามแบบ เนื่องจากเครื่องนี้ไม่ต้องใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก สารตัวอย่างทำหน้าที่เป็นแหล่งให้รังสี ภาชนะที่ใส่สารตัวอย่างเป็นที่ที่มีอุปกรณ์การอาร์ก (arc) สปาร์ค (spark) และเปลว (flame) ซึ่งทำหน้าที่ใส่สารตัวอย่างและเป็นแหล่งที่ทำให้สารตัวอย่างปล่อยรังสี

แอ็บซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (Absorption Spectroscopy) ฟลูออเรสเซนซ์ ฟอสฟอเรสเซนซ์และสแกตเตอริงสเปกโทรสโกปี (fluorescence and scattering spectroscopy) ใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก อุปกรณ์ที่ใช้หลักการดูดกลืนรังสี รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีผ่านอุปกรณ์แยกความยาวคลื่น แล้วเข้าสู่สารตัวอย่าง รังสีที่ออกจากสารตัวอย่างจะผ่านเข้าสู่เครื่องตรวจหา เครื่องสเปกโทรบางเครื่องออกแบบให้รังสีที่ออกจากแหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดรังสี (Radiation Sources)

การศึกษาทางสเปกโทร แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ต้องให้รังสีที่มีกำลัง หรือความเข้มเพียงพอที่เครื่องตรวจหาจะวัดได้ ความเข้มจากแหล่งกำเนิดรังสีต้องคงที่ ความเข้มของแหล่งกำเนิดรังสีเปลี่ยนเมื่อกำลังไฟฟ้าที่ให้กับแหล่งกำเนิดรังสีเปลี่ยน แหล่งกำเนิดรังสีจึงต้องมีอุปกรณ์จัดหากำลังไฟฟ้าที่คงที่ อีกวิธีหนึ่งจะทำให้การวัดความเข้มของแหล่งกำเนิดรังสีได้ถูกต้องทำได้โดยให้ลำรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีแยกเป็นสองลำ ลำหนึ่งเป็นลำรังสีอ้างอิง ลำที่สองเป็นลำรังสีตัวอย่าง ลำรังสีชุดแรกให้ผ่านเข้าสู่ทรานซ์ดิวเซอร์ ลำรังสีที่ออกจากสารตัวอย่างผ่านเข้าสู่ทรานซ์ดิวเซอร์อีกชุดหนึ่งที่เหมาะสมกับทรานซ์ดิวเซอร์ชุดแรก (เครื่องตรวจหาบางชนิดมีทรานซ์ดิวเซอร์ชุดเดียวทำหน้าที่วัดความเข้มของลำรังสีที่ผ่านจากสารตัวอย่างและสารอ้างอิงสลับกัน) อัตราส่วนของความเข้มที่ได้จากทรานซ์ดิวเซอร์ทั้งสองใช้เป็นพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แบบลำรังสีคู่จะวัดได้ถูกต้องแม้ว่าความเข้มจากแหล่งกำเนิดรังสีไม่คงที่ เครื่องออปติคัลสเปกโทรใช้แหล่งกำเนิดรังสีแบบต่อเนื่องและแบบเส้น เครื่องสเปกโทรที่ใช้แหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องใช้ในการวิเคราะห์การดูดกลืนของโมเลกุล เครื่องสเปกโทรที่ใช้แหล่งกำเนิดรังสีแบบเส้น ใช้ในการวิเคราะห์การดูดกลืนของอะตอมและฟลูออเรสเซนซ์

แหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลและช่วงใกล้อินฟราเรด

(Continuous Sources of Ultraviolet, Visible and Near-Infrared Radiation)

แหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องให้รังสีที่มีความเข้ม (กำลัง) เปลี่ยนไปเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น

หลอดไฮโดรเจนหรือดิวเทอเรียม (Hydrogen or Deuterium Lamps) ให้สเปกตรัมช่วงอัลตราไวโอเล็ตแบบต่อเนื่อง สเปกตรัมนี้ได้จากการใช้ไฟฟ้ากระตุ้นแก๊สไฮโดรเจนหรือดิวเทอเรียมที่มีความดันต่ำ

หลอดไฮโดรเจนที่ใช้มีสองแบบ แบบแรกใช้ศักย์สูง 2,000 ถึง 6,000 โวลต์เพื่อให้เกิดการดิซชาร์จระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม หลอดนี้ให้ความเข้มสูงและมีความร้อนมาก จึงต้องใช้น้ำระบายความร้อน แบบที่สองใช้ศักย์กระแสตรงที่มีค่าต่ำประมาณ 40 โวลต์เพื่อทำให้เกิดการอาร์กกระหว่างไส้หลอดที่หุ้มด้วยออกไซด์และขั้วไฟฟ้าโลหะ ไส้หลอดเมื่อได้รับความร้อนจะปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนนี้จะชนแก๊สไฮโดรเจนให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มคงที่ หลอดไฮโดรเจนหรือดิวเทอเรียมให้รังสีอัลตราไวโอเล็ต

ช่วงความยาวคลื่น 160 ถึง 375 นาโนเมตร หน้าต่างหลอดทำด้วยควออร์ตซ์ ถ้าใช้แก้วทำ หน้าต่าง แก้วจะดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต

หลอดที่ใช้ไส้ทังสเตน (Tungsten Filament Lamps) แหล่งกำเนิดรังสีช่วงวิสิเบิล และช่วงใกล้อินฟราเรด เป็นหลอดที่มีไส้เป็นทังสเตน การกระจายพลังงานของหลอดแบบนี้ คล้ายกับวัตถุดำ (black body) เมื่อได้รับศักย์หลอดนี้จะมีอุณหภูมิสูงถึง 2,800 องศา เคลวิน และให้รังสีช่วงความยาวคลื่น 320-2,500 นาโนเมตร พลังงานที่ได้จากหลอดนี้แปรโดยตรงกับ ศักย์ยกกำลังสี่ ศักย์ที่ให้หลอดได้จากหม้อแปลงหรือเครื่องควบคุมศักย์ให้คงที่

หลอดอาร์กซีนอน (Xenon Arc Lamps) หลอดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูง หลังจาก ผ่านกระแสดำเข้าไปในบรรยากาศซีนอน สเปกตรัมที่ได้เป็นแบบต่อเนื่อง ช่วงความยาว คลื่น 250-600 นาโนเมตร หลอดนี้ให้รังสีที่มีความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

แหล่งกำเนิดรังสีที่ให้ความยาวคลื่นอินฟราเรดแบบต่อเนื่อง

(Continuous Sources of Infrared Radiation)

แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดเป็นของแข็งที่ไม่ว่องไว เมื่อได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิ สูงถึง 1,500 ถึง 2,000 องศาเคลวินจะให้รังสีต่อเนื่อง แหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่องนี้คล้ายกับ วัตถุดำ รังสีนี้ให้ความเข้มแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 1.7 ถึง 2.0 ไมโครเมตร (6,000 ถึง 5,000 ต่อเซนติเมตร) บริเวณที่มีความยาวคลื่นมากกว่านี้ ความเข้มลดลงอย่างรวดเร็ว เหลือร้อยละ 1 ของความเข้มสูงสุดที่ความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร (667 ต่อเซนติเมตร) บริเวณที่มีความยาวคลื่นสั้นความเข้มลดลงมากโดยความเข้มเหลือประมาณร้อยละ 1 ที่ ความยาวคลื่น 1 ไมโครเมตร (1,000 ต่อเซนติเมตร)

แนนสต์โกลออร์ (Nernst Glower) ไส้หลอดนี้ทำจากออกไซด์ของธาตุที่หายาก เช่น ออกไซด์ของซีเรียม เซอร์โคเนียม ทอเรียมและอิตเทรียม บรรจุอยู่ในหลอดรูปทรงกระบอก ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ถึง 2 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร ลวดแพลทินัมที่ต่ออยู่กับหลอดทำ หน้าทีคุมกระแสที่ผ่าน หลอดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงโดยให้กระแสที่เหมาะสมกับขดลวด เพื่อให้ไส้หลอดร้อนตามต้องการ

โกลบาร์ (Globar) เป็นแท่งซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร หลอดนี้ให้ความเข้มรังสีมากกว่าแนนสต์โกลออร์ตรงความยาวคลื่นสั้นกว่า 5 ไมโครเมตร แต่ที่ความยาวคลื่นอื่นให้ความเข้มรังสีพอ ๆ กัน อุณหภูมิที่ไส้หลอดต่ำกว่า แบบแนนสต์โกลออร์แต่ต้องระบายความร้อนจากหลอดด้วยน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ อารัก

ลวดนิโครมและลวดโรเดียม (Nichrome and Rhodium wire) ให้รังสีที่มีความเข้มข้นน้อย แต่อายุใช้งานนาน

แหล่งกำเนิดรังสีแบบเส้น (Line Sources)

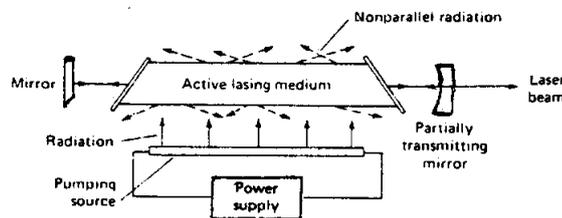
แหล่งกำเนิดรังสีแบบเส้น (มีพลังงานแน่นอน) ใช้ในการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีโดยอะตอม (atomic absorption spectroscopy) รามันสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) รีแฟรกโตเมตรี (Refractometry) และโพลาริเมตรี (Polarimetry)

หลอดไอของโลหะ (Metal vapor lamps) แหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ระบบนี้ ได้แก่หลอดที่บรรจุไอของปรอทและโซเดียม หลอดพวกนี้บรรจุด้วยไอของธาตุที่มีความดันต่ำเมื่อไอของธาตุเหล่านี้ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าถูกกระตุ้น จะให้เส้นสเปกตรัมของธาตุออกมา หลอดปรอทให้เส้นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 254 ถึง 734 นาโนเมตร หลอดโซเดียมให้เส้นสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่น 589.0 และ 589.6 นาโนเมตร

หลอดฮอลโลแคโทด (Hollow cathode lamps) ให้เส้นสเปกตรัม หลอดนี้แคโทดทำจากโลหะที่ต้องการให้เส้นสเปกตรัมตามต้องการ หลอดนี้ใช้กับเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน และอะตอมมิกฟลูออเรสเซนซ์

เลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์ (Laser) สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1960 แหล่งกำเนิดรังสีนี้ใช้ในการศึกษาทางจลนศาสตร์ของระบบที่มีช่วงชีวิตอยู่ในช่วง 10^{-9} ถึง 10^{-12} วินาที ใช้วิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อย ๆ โดยวิธีรามันสเปกโทรสโกปี อิมิสชันสเปกโทรสโกปี และฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัมสเปกโทรสโกปี เลเซอร์ (Laser) คือ แสงที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นโดยรังสีที่ถูกกระตุ้นเปล่งรังสีออกมา (Light amplification by stimulated emission of radiation) จากคุณสมบัติของแสงที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น เลเซอร์จึงเป็นรังสีที่มีความยาวคลื่นช่วงแคบ ๆ และมีความเข้มสูง กระบวนการการเปล่งรังสีที่ถูกกระตุ้น (stimulated emission) ทำให้ได้ลำรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว (มีแถบความกว้างเท่ากับหรือน้อยกว่า 0.01 นาโนเมตร) และรังสีนี้เป็นแบบอาพันธ์ จากคุณสมบัติที่กล่าวนี้ จึงใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิล และอินฟราเรด



รูป 3-3 แหล่งกำเนิดรังสีเลเซอร์

รูป 3-3 เป็นองค์ประกอบของแหล่งกำเนิดรังสีเลเซอร์ หัวใจของอุปกรณ์นี้คือตัวกลางเลเซอร์ (lasing medium) ตัวกลางเลเซอร์เป็นผลึกของแข็ง เช่น รูบี้ (ruby) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น แกเลียมอาร์ซีไนด์ สารละลายของสีย้อมอินทรีย์ (organic dye) หรือแก๊ส วัสดุที่ให้เลเซอร์ต้องถูกกระตุ้นหรือถูกปั๊มโดยรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีภายนอก เพื่อให้ได้โฟตอนที่มีพลังงานแน่นอนปริมาณเล็กน้อย โฟตอนนี้ทำหน้าที่จุดตัวกลางเลเซอร์ให้เกิดโฟตอนที่มีพลังงานเท่าเดิมจำนวนมาก การปั๊มทำได้โดยใช้กระแสไฟฟ้าหรือดิซชาร์จด้วยไฟฟ้า เลเซอร์แก๊สไม่ต้องใช้แหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอกแต่ใช้แหล่งที่ให้กำลังไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่งที่อยู่ใกล้เซลล์ที่บรรจุแก๊ส

แหล่งจัดหากำลัง (power supply) ที่ต่ออยู่กับขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่ง ดังรูป 3-3 ขั้วไฟฟ้าคู่นี้อยู่ในเซลล์ที่มีแก๊สอยู่

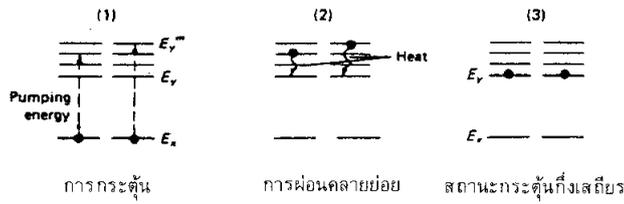
ปกติการทำงานของเลเซอร์เป็นการแกว่งกวัด รังสีที่ได้จากกระบวนการนี้เกิดการผ่านไปข้างหลังและข้างหน้าผ่านตัวกลางหลายครั้งโดยใช้กระจกเงาคู่หนึ่งดังรูป 3-3 โฟตอนที่เกิดขึ้นจากแต่ละชั้นตอนนี้ ทำให้ได้รังสีปริมาณมาก การผ่านไปผ่านมาของรังสีหลาย ๆ ครั้งทำให้ได้ลำรังสีที่อยู่ในแนวขนานกัน ส่วนลำรังสีที่ไม่ขนานกันจะหนีออกจากตัวกลางหลังจากเกิดการสะท้อนสองสามครั้ง

ลำแสงเลเซอร์ที่ใช้งานจะต้องได้จากกระจกเงาอันหนึ่งที่เคลือบด้วยชั้นบาง ๆ ของวัสดุสะท้อนแสง เพื่อให้ได้ลำรังสีส่วนหนึ่งผ่านออกมามากกว่าการสะท้อนกลับ

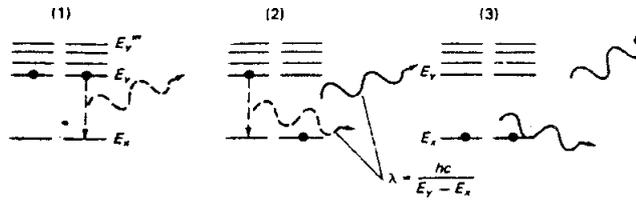
ขั้นตอนการเกิดเลเซอร์ (Laser action)

1. การปั๊ม (pumping)
2. การเปล่งรังสีออกมาทันที (spontaneous emission) ให้เรโซแนนซ์ฟลูออเรสเซนซ์
3. การเปล่งรังสีที่ถูกกระตุ้น (stimulated emission)
4. การดูดกลืน (absorption)

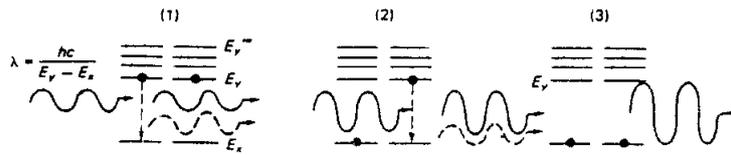
จากขั้นตอนเหล่านี้ เราจะดูเฉพาะระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์หลายอันที่มีอยู่ในอะตอม ไอออน หรือโมเลกุลที่ใช้เป็นวัสดุที่เป็นเลเซอร์ ระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์มีหลายระดับ แต่เราจะดูเพียงสองระดับ จากรูป 3-4 ระดับพลังงานอิเล็กทรอนิกส์มีพลังงานสองค่า E_y และ E_x สถานะอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพลังงานสูงมีระดับพลังงานการสั่นหลายระดับ พลังงานการสั่น E_y, E_y', E_y'' และอื่น ๆ ส่วนระดับที่มีพลังงานต่ำไม่ได้แสดงระดับพลังงานการสั่นต่าง ๆ



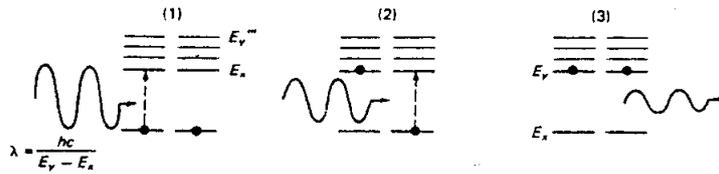
(ก) การปั๊ม (กระตุ้นด้วยไฟฟ้า รังสี หรือพลังงานเคมี)



(ข) การเปล่งรังสีออกมาทันที



(ค) การเปล่งรังสีที่ถูกกระตุ้น



(ง) การดูดกลืน

รูป 3-4 กระบวนการที่ทำให้เกิดเลเซอร์ที่สำคัญมีสี่ขั้นตอน

- (ก) การปั๊ม (การกระตุ้นด้วยไฟฟ้า รังสีหรือพลังงานเคมี)
- (ข) การเปล่งรังสีออกมาทันที
- (ค) การเปล่งรังสี ออกมาหลังจากถูกกระตุ้น
- (ง) การดูดกลืน

การปั๊ม (Pumping) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการเกิดเลเซอร์ กระบวนการนี้สปีชีส์ที่ให้เลเซอร์จะถูกกระตุ้น (ได้รับพลังงาน) โดยการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า การผ่านกระแสเข้าไป (ให้รังสีที่มีความเข้มสูง) หรือให้เกิดอันตรกิริยากับสปีชีส์เคมี ทำให้สปีชีส์ที่ให้เลเซอร์กระโดดไปสู่สถานะกระตุ้น สถานะกระตุ้นมีระดับพลังงานการสั่นหลายค่า ดังรูป 3-

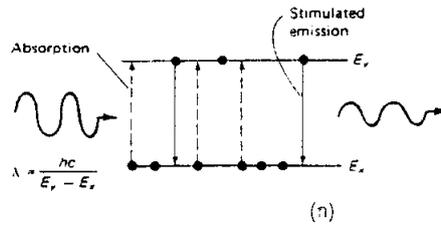
4 (ก-1) อะตอม (โมเลกุล) หนึ่ง กระโดดไปสู่สถานะกระตุ้น E₂ " อะตอม (โมเลกุล) สอง กระโดดไปสู่สถานะกระตุ้น E₁ " ช่วงชีวิตของสถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานในการสั่นมากจะมีค่าน้อย ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 10⁻¹¹ ถึง 10⁻¹² วินาทีจะเกิดการผ่อนคลายแล้วกลับสู่สถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานในการสั่นต่ำสุด E₁ โดยการปล่อยความร้อนออกมา ดังรูป 3-4 (ก-2) พลังงานนี้วัดไม่ได้ อะตอม (โมเลกุล) จะอยู่ที่สถานะกระตุ้นที่มีระดับพลังงานในการสั่นต่ำสุด ดังรูป 3-4 (ก-3)

การเปล่งรังสีออกมาทันทีทันใด รังสีฟลูออเรสเซนซ์เกิดจากสปีชีส์ที่อยู่ในสถานะกระตุ้นที่มีพลังงานต่ำสุดปล่อยพลังงานที่มากเกินพอออกมา มีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานไฟฟ้า E₂ - E₁ การเปล่งรังสีออกมาทันทีที่เป็นกระบวนการตามยถากรรม ดังรูป 3-4 (ข-1) รังสีฟลูออเรสเซนซ์เกิดจากอนุภาคหนึ่ง มีทิศทางและเฟสต่างจากอนุภาคสอง ดังรูป 3-4 (ข-2) การเปล่งรังสีออกมาทันทีทันใดจะให้รังสีที่ไม่อาพันธ์ดังรูป 3-4 (ข-3)

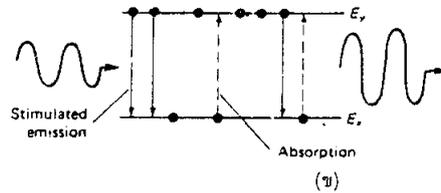
การเปล่งรังสีที่ถูกกระตุ้น (stimulated emission) ขั้นตอนนี้เป็นความประพฤติของเลเซอร์ ดังรูป 3-4 (ค) อนุภาคเลเซอร์ที่อยู่ในสถานะกระตุ้นถูกชนโดยโฟตอนจากภายนอกที่มีพลังงาน (E₂ - E₁) เท่ากันกับผลต่างพลังงานของอนุภาคเลเซอร์ระหว่างสถานะกระตุ้นและสถานะพื้น การชนของรังสีกับอนุภาคเลเซอร์นี้ทำให้อนุภาคเลเซอร์ให้โฟตอนแล้วกลับสู่สถานะพื้น พลังงานนี้มีค่าเท่ากับพลังงานในการเปล่งรังสีตามยถากรรม แต่รังสีที่เปล่งออกมาอยู่ในเฟสเดียวกันกับโฟตอนที่ใช้ในการกระตุ้นตัวกลางเลเซอร์ ดังนั้น รังสีที่เปล่งออกมาจากกระบวนการถูกกระตุ้นจึงเป็นแบบอาพันธ์และมีความเข้มสูง

การดูดกลืน กระบวนการนี้เป็นการแก่งแย่งกับรังสีที่เปล่งออกมาหลังจากถูกกระตุ้น โฟตอนสองโฟตอนที่พลังงานเท่ากับ E₂ - E₁ จะถูกดูดกลืน และให้สถานะกระตุ้นกึ่งเสถียร (metastable) รูป 3-4 (ง-3) มีค่าเท่ากับการปั๊ม (ก-3)

การผกผันของประชากรและการเพิ่มปริมาณแสง (Population Inversion and Light Amplification) การเพิ่มปริมาณแสงจากแหล่งกำเนิดรังสีเลเซอร์ โดยจำนวนโฟตอนที่เกิดจากการกระตุ้นเปล่งออกมา มีมากกว่าจำนวนโฟตอนที่สูญเสียไปโดยการดูดกลืน สภาพนี้เกิดเมื่อจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานสูงมีมากกว่าจำนวนอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดการผกผันของประชากรที่มีระดับพลังงานต่างกัน การผกผันของประชากรเกิดจากการปั๊ม ดังรูป 3-5 แสดงผลของรังสีที่เข้ามาบริเวณที่ไม่มีผกผันประชากร (noninverted population) และบริเวณที่มีการผกผันประชากร (inverted population)



ปริมาณแสงลดลง เนื่องจากการดูดกลืน



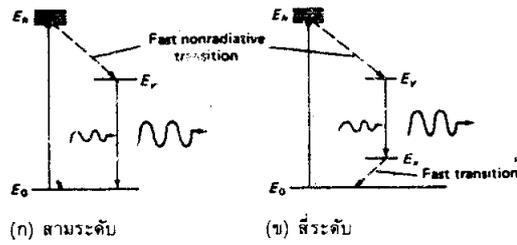
ปริมาณแสงเพิ่มขึ้นเนื่องจากรังสีที่ถูกกระตุ้นเปล่งออกมา

รูป 3-5 รังสีที่ผ่านเข้าไป

- ก. บริเวณที่ไม่มีการหักเหประชากร
- ข. บริเวณที่มีการหักเหประชากร

ระบบเลเซอร์ที่มีสามหรือสี่ระดับ (Three and Four Level Laser) รูป 3-6 แทนแผนภูมิระดับพลังงานของระบบเลเซอร์ ระบบเลเซอร์สามระดับเกิดจากการทรานซิชันระหว่างสถานะกระตุ้น E_2 กับสถานะพื้น E_0 ระบบเลเซอร์สี่ระดับเกิดจากการทรานซิชันจากสถานะกระตุ้น E_3 กับสถานะ E_2 ที่มีพลังงานสูงกว่าสถานะพื้นเล็กน้อย การทรานซิชันระหว่างสถานะ E_2 และสถานะพื้น E_0 เกิดขึ้นเร็วมาก

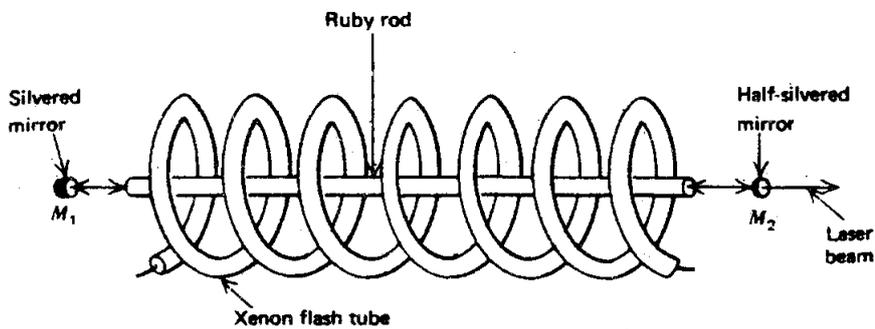
ข้อดีของเลเซอร์สี่ระดับคือการหักเหประชากรเพื่อให้ได้เลเซอร์เกิดเร็วมาก ที่อุณหภูมิห้องอนุภาค (สปีชีส์) เลเซอร์จะอยู่ที่สถานะพื้น E_0 ทั้งสองระบบ เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอและทำให้สปีชีส์ที่ให้เลเซอร์มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์เปลี่ยนไปสู่สถานะกระตุ้นจัดเป็นเลเซอร์สามระดับ ส่วนเลเซอร์สี่ระดับใช้พลังงานในการปั๊ม (ไม่มาก) เพื่อให้สปีชีส์ที่ให้เลเซอร์มีปริมาณมากกว่าจำนวนสปีชีส์ในสถานะ E_2 ช่วงชีวิตของอนุภาค (สปีชีส์) ที่อยู่ในสถานะ E_2 สั้น เนื่องจากอนุภาคที่ E_2 เกิดการทรานซิชันไป E_0 อย่างรวดเร็ว ดังนั้นอนุภาคที่ E_2 จึงมีน้อยกว่า E_0 มาก จำนวนพลังงานที่ใช้กระตุ้นเพื่อให้เกิดเลเซอร์สี่ระดับจึงมีค่าไม่มาก



รูป 3-6 แผนภูมิมะระดับพลังงานของระบบเลเซอร์สามและสี่ระดับ

ตัวอย่างเลเซอร์บางชนิดที่นำมาใช้ประโยชน์ได้ Some Examples of Useful Lasers

โซลิดสเตทเลเซอร์ เลเซอร์ Solid state Lasers เลเซอร์ชุดแรกที่น่ามาใช้และยังคงนำมาใช้ถึงปัจจุบัน คือ เลเซอร์สามระดับ ใช้ผลึกรูบี้ (Ruby) เป็นตัวกลางกัมมันต์รูบี้เป็น Al_2O_3 ที่มี Cr (III) ปนอยู่ 0.05 เซนติเมตร โดย Cr แทรกตัวอยู่ในการจัดตัวของ Al (III) และมีสีแดง ไอออนโครเมียม(III) เป็นตัวกลางกัมมันต์ การผลิตเลเซอร์ยุคแรก ทำรูบี้เป็นแท่งยาว 4 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร หลอดควาไฟฟ้าเป็นหลอดซีนอตกความดันต่ำล้อมรอบแท่งรูบี้ ให้รังสีความเข้มสูงที่ความยาวคลื่น 694.3 นาโนเมตร ดังรูป 3-7 การปั๊มหรือให้พลังงานเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ลำแสงที่ได้เป็นแบบพัลส์ (จังหวะ) ปัจจุบันมีการผลิตแหล่งกำเนิดรูบี้เลเซอร์แบบต่อเนื่องใช้แล้ว



รูป 3-7 รูบี้เลเซอร์

นีโอดีเมียม: แยก (Nd:Yac) เลเซอร์ เป็นโซลิดสเตทเลเซอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด เลเซอร์นี้เป็นไอออนนีโอดีเมียมอยู่ในผลึกอิตเทรียมอะลูมิเนียม ระบบนี้เป็นเลเซอร์ที่ระดับการผกผันประชากรเกิดง่าย เลเซอร์ Nd:Yac ให้ลำรังสีความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร และยังให้ลำรังสีที่ความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร รังสีนี้นิยมใช้เป็นแหล่งให้พลังงาน (pumping) กับเครื่องเลเซอร์ที่ปรับความยาวคลื่นได้ (Tunable dye laser)

เลเซอร์ก๊าซ เลเซอร์ก๊าซที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมมีสี่แบบ 1 อะตอมเลเซอร์ที่เป็นกลางเช่น He/Ne 2 ไอออนเลเซอร์เป็นสปีซีส์กัมมันต์ เช่น Ar^+ หรือ Kr^+ 3 โมเลกุลเลเซอร์ ตัวอย่างเลเซอร์ที่ใช้ได้แก่ CO_2 หรือ N_2 4 เอ็กซ์ซิเมอร์ (eximer) เลเซอร์ เลเซอร์ ฮีเลียมนีออนนิยมใช้มากที่สุดให้รังสีที่ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร เพราะราคาถูก ดูแลรักษาง่าย ความเข้มรังสีสม่ำเสมอ ใช้พลังงานน้อย (กินไฟน้อย) เลเซอร์ชนิดนี้นิยมทำเป็นโมดให้รังสีต่อเนื่อง

เลเซอร์ไอออนอาร์กอน ให้รังสีแบบเส้น ความเข้มสูง โดยให้รังสีสีเขียว 514.5 นาโนเมตร สีน้ำเงิน 488.0 นาโนเมตร เลเซอร์แบบนี้จัดเป็นเลเซอร์ที่ระดับ แหล่งให้พลังงานต้องมีกำลังสูงมากจึงใช้หลักการคิซาร์จ (เกิดประกายไฟ) ด้วยไฟฟ้า หรือความถี่วิทยุทำให้อะตอมอาร์กอนเสียอิเล็กตรอนและเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น (จาก 3s หรือ 3p ไปสู่ 4p) ไอออนในสถานะกระตุ้นเกิดการผ่อนคลายโดยการสั่นแล้วกลับสู่ 4s เลเซอร์ไอออนอาร์กอนมีความเข้มสูงและให้รังสีแบบเส้น จึงนิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีของเครื่องสเปกโทรฟลูออเรสเซนซ์ และรามัน

เลเซอร์เอ็กซ์ซิเมอร์ เป็นก๊าซผสมของฮีเลียม ฟลูออรีน กับก๊าซหายากเช่น อาร์กอน หรือ คริปทอน หรือ ซีนอน ใช้กระแสไฟฟ้ากระตุ้นก๊าซหายาก และให้ทำปฏิกิริยากับฟลูออรีนเกิด ไอออน ArF^+ หรือ KrF^+ หรือ XeF^+ เรียก เอ็กซ์ซิเมอร์ เอ็กซ์ซิเมอร์เสถียรเฉพาะในสถานะกระตุ้น เอ็กซ์ซิเมอร์สถานะพื้นไม่เสถียร สารประกอบนี้จะเกิดการแตกตัวอย่างเร็วและให้โฟตอน การผกผันประชากรนี้จะเกิดตลอดเวลาที่มีการปั๊ม เลเซอร์เอ็กซ์ซิเมอร์ให้รังสีแบบพัลส์ช่วงอัลตราไวโอเล็ต XeF 351 นาโนเมตร KrF 248 นาโนเมตร ArF 193 นาโนเมตร

เลเซอร์สีย้อม Dye Lasers เลเซอร์สีย้อมเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้งานเคมีวิเคราะห์ เลเซอร์ชนิดนี้ปรับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 20-50 นาโนเมตร แถบความกว้างของเลเซอร์มีค่าเป็นจุดของอังสตรอม ตัวอย่างเลเซอร์กัมมันต์เป็นสารละลายของสารประกอบ

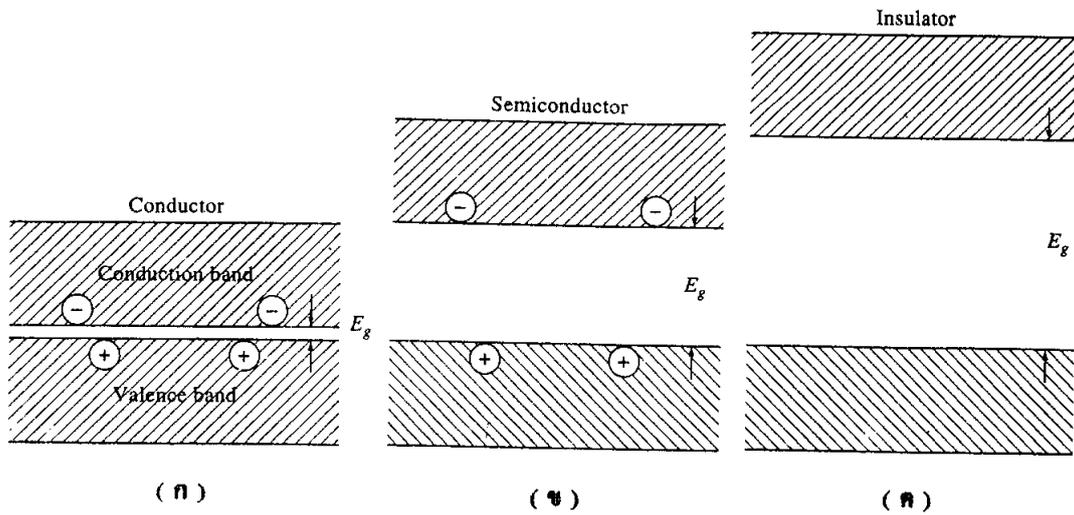
สีอินทรีให้แสงฟลูออเรสเซนซ์ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต วิติเบิด อินฟราเรด เลเซอร์สีเขียว
 จัดเป็นเลเซอร์ที่ระดับ ตัวกลางเลเซอร์ก็มันต์เป็นโมเลกุลที่สถานะพื้น โดยที่สถานะพื้น
 E_x มีพลังงานการสั่นและการหมุนหลายค่าและมีพลังงานใกล้เคียงกัน ที่สถานะกระตุ้น E_y เกิด
 จากอิเล็กตรอนในโมเลกุลที่สถานะพื้น (สถานะการสั่นและการหมุนต่างๆ) คุกกลืนพลัง
 งานเหมาะสม (มีค่าต่างกันเล็กน้อย) จึงได้โฟตอนที่มีพลังงานใกล้เคียงกันหลายค่า การ
 ปรับรังสีเลเซอร์ให้มีความยาวคลื่นเดียวทำได้โดยเปลี่ยนกระจกเงาด้านที่สะท้อนแสงเป็นเกรต
 ดิงแบบสะท้อนแสง หรือ ปริซึมลิทโทรว์ รังสีที่ผ่านเป็นรังสีเลเซอร์ความยาวคลื่นเดียว

เซมิคอนดักเตอร์ไดโอดเลเซอร์ Semiconductor Diode Lasers

แหล่งกำเนิดรังสีเลเซอร์แบบความยาวคลื่นเดียวเป็นเลเซอร์ไดโอด การผลิตรังสี
 เลเซอร์ความยาวคลื่นเดียวใช้เทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์แบบใหม่ กลไกการทำงานอธิบาย
 จากคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของโลหะชนิดต่างๆ ดังรูป 3-8 ก ตัวนำที่ดี เช่น โลหะ การจัด
 ตัวของอะตอมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนของทุกอะตอมอยู่ทางด้านล่าง ด้านบนเป็นแถบนำ ซึ่ง
 มีพลังงานสูงกว่าแถบเวเลนซ์เล็กน้อย ผลต่างพลังงานระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบนำมีค่า
 E_g เรียกช่องว่างแถบ (band gap energy) อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับความร้อนเพียง
 เล็กน้อยจะเปลี่ยนไปที่แถบนำ หรือ เกิดการเคลื่อนที่ของประจุทำให้เกิดการนำ

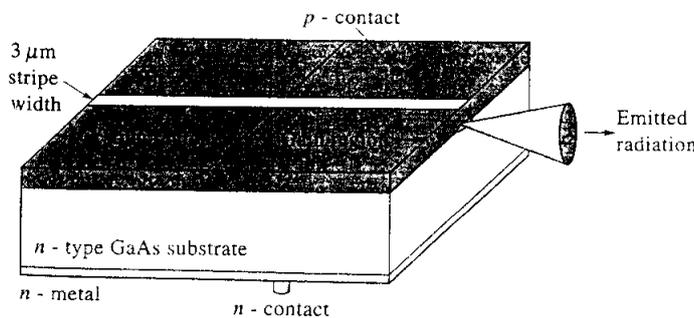
ฉนวน (insulators) มีช่องว่างแถบมาก (พลังงานมาก) อิเล็กตรอนในแถบ
 เวเลนซ์จะเปลี่ยนเป็นแถบนำต้องใช้พลังงานมาก ฉนวนจึงไม่นำไฟฟ้า ดังรูป 3-8 ค สาร
 กึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน หรือ เยอรมาเนียม มีช่องว่างแถบพลังงานปานกลาง การนำไฟฟ้า
 ของสารกึ่งตัวนำ หรือ ฉนวนขึ้นกับ -ช่องว่างแถบพลังงาน - และอุณหภูมิการทำงาน ค่า
 ทั้งสองสัมพันธ์กับศักย์ที่ใส่ให้กับวัสดุ

เมื่อใส่ศักย์คร่อมไดโอดกึ่งตัวนำ (semiconductor diode) โดยด้านบวกใส่ศักย์บวก
 ด้านลบใส่ศักย์ลบ อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ถูกกระตุ้นสู่แถบนำทำให้เกิด โฮล (ประจุ
 บวก) และอิเล็กตรอน ไดโอดนำไฟฟ้าได้ อิเล็กตรอนบางตัวในสถานะกระตุ้นเกิดการ
 ผ่อนคลาย (relax) และกลับสู่สถานะพื้น (แถบเวเลนซ์) จะปล่อยพลังงานออกมา พลัง
 งานนี้มีค่าเท่ากับพลังงานช่องว่างแถบ $E_g = h\nu$ ถ้าคิดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้
 ความถี่ $\nu = E_g / h$ การใช้ไดโอดผลิตแสงเรียก แสงเปล่งจากไดโอด (light emitting
 diode LEDs) LEDs ทำจากแกเลียมอาร์ซีไนด์ที่โดพด้วยฟอสฟอรัส แถบพลังงานช่อง
 ว่างของ LEDs ชนิดนี้ตรงกับความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร แสงสีแดงจาก LEDs ใช้กับ
 เครื่องมืออ่านสัญญาณ แสงที่ได้มีความเข้มไม่สูงมากจึงใช้กับเครื่องสเปกโทรเท่านั้น



รูป 3-8 แถบนำและแถบเวเลนซ์ของวัสดุสามชนิด (ก) ตัวนำ (ข) กึ่งตัวนำ (ค) ฉนวน

ปัจจุบันผลิตเซมิคอนดักเตอร์ใช้กับเครื่องรวมสัญญาณเลเซอร์ไดโอดโดยใช้หลักการกระจายของแบร์ริคแบบสะท้อน (distributed Bragg reflector DBSR) ดังรูป 3-9 อุปกรณ์นี้มีแกเลียมอาร์ซีไนด์กับ pn junction ไดโอด ให้รังสีอินฟราเรดความยาวคลื่น 975 นาโนเมตร บนอุปกรณ์นี้ (chip) มีแถบโลหะยาวขนาดกว้าง 3 ไมโครเมตรทำหน้าที่เป็นห้องที่ให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน (resonant cavity) ภายในห้องนี้มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเมื่อรังสีโคฮีเรนต์กัน เกรตติงทำหน้าที่คัดเลือกรังสีความยาวคลื่นเดียวและให้แถบกว้าง 10^{-5} นาโนเมตร เลเซอร์ไดโอดแบบนี้ให้กำลังรังสีที่มีความเข้มมากกว่า 100 มิลลิวัตต์ ความเสถียรต่อความร้อน 0.1 นาโนเมตรต่อองศาเซลเซียส เลเซอร์ไดโอดแบบนี้ทำงานได้ทั้งโมดจังหวะและต่อเนื่อง ปัจจุบันนำเลเซอร์ไดโอดมาเป็นแหล่งกำเนิดเครื่อง



รูป 3-9 การกระจายของเลเซอร์ไดโอดแบบสะท้อนของแบร์ริค

เล่นคอมพิวเตอร์ เครื่องขับ ซีดีรอม เครื่องสแกนรหัส (bar code) เครื่องอิเล็กทรอนิกส์
 นิกเชิงแสง ในอนาคตเลเซอร์ไดโอดน่าจะมีราคาถูก

เลเซอร์ไดโอดชนิดโมคต่อนื่องนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องสเปกโทรได้เฉพาะช่วง
 แสงสีแดงและใต้แดง (infrared) ถ้านำเลเซอร์ไดโอดมาทำโมคจังหวะ ความถี่รังสีที่ได้
 จะมีค่าเป็นสองเท่าของรังสีเดิม (ความยาวคลื่นลดลงครึ่งหนึ่ง) ดังรูป 3-10 รังสีที่ออก
 จากเลเซอร์ไดโอดถูกโฟกัสโดยเลนส์เว้าสองตัว แล้วผ่านเข้าผลึกที่ทำหน้าที่เพิ่มความถี่เป็น
 สองเท่า 0.5-1.0 วัตต์ ถ้าใช้อุปกรณ์ความยาวคลื่นจะได้รังสีช่วงความยาวคลื่นกว้างประมาณ
 30 นาโนเมตร ปัจจุบันใช้แกเลียมไนไตรด์เลเซอร์ไดโอดให้สเปกตรัมสีน้ำเงิน เขียว
 เหลือง การประยุกต์นำเอาเลเซอร์ไดโอดมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อศึกษาวิธีทางสเปก
 โทร 1 การดูคลื่นโมเลกุล 2 โมเลกุลาร์ฟลูออเรสเซนซ์ 3 การดูคลื่นอะตอม และยัง
 ใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับเครื่องตรวจหากับเทคนิคโครมาโตกราฟี

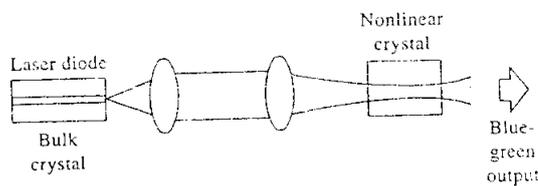
ปรากฏการณ์ออปติกไม่เชิงเส้นกับเลเซอร์ Nonlinear Optic Effects with Lasers

เมื่อรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางไดอิเล็กทริก สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของรังสีทำให้อิเล็กตรอนวงนอกสุดของตัวกลางเกิดการบิดรูป (distortion) หรือ เกิดการมีขั้วได้ (polarization) ชั่วขณะ ขนาดของการโพลาไรส์จากตัวกลางขึ้นกับขนาดของสนามไฟฟ้า E ของรังสีที่ชน

$$P = \alpha E$$

α ค่าคงที่ α มีค่าเป็นแบบเชิงเส้นของปรากฏการณ์เชิงแสง

ถ้ารังสีที่ชนตัวกลางมีความเข้มมากจะไม่เกิดปรากฏการณ์แบบมีขั้ว เพราะรังสีที่ชนมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน จะเกิดปรากฏการณ์ออปติกไม่เชิงเส้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างการมีขั้วกับสนามไฟฟ้าเขียนเป็นสมการได้



รูป 3-10 ระบบเพิ่มความถี่ขึ้นสองเท่า ลำรังสีเข้าความยาวคลื่น 975 นาโนเมตร เปลี่ยนเป็น
 ลำรังสีออก 490 นาโนเมตร

$$P = \alpha E + \beta E^2 + \gamma E^3 \quad 3-1$$

ค่า $\alpha > \beta > \gamma$ ถ้ารังสีจากเลเซอร์ที่ชนมีความเข้มไม่มาก เฉพาะ α เท่านั้นที่สำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างการมีพัลส์กับความแรงสนามเป็นแบบเส้นตรง ถ้ารังสีที่ชนมีความเข้มมากต้องใช้เทอมที่สอง β มาอธิบายกำลังการมีพัลส์ และเขียนสมการในเทอมความถี่รังสี ω และขนาดความแรงสนาม E_m เทอมที่สามไม่ค่อยใช้

$$P = \alpha E_m \sin \omega t + \beta E_m^2 \sin^2 \omega t \quad 3-2$$

ใช้หลักตรีโกณช่วยโดยแทน $\sin^2 \omega t$ ด้วย $1/2 (1 - \cos 2\omega t)$

$$P = \alpha E_m \sin \omega t + \beta E_m^2 * 1/2 (1 - \cos 2\omega t) \quad 3-3$$

เทอมหนึ่งของสมการ 3-3 เป็นแบบเชิงเส้นเมื่อรังสีที่ชนมีความเข้มต่ำ ถ้ารังสีที่ชนมีความเข้มสูง เทอมสองสำคัญ และให้รังสีความถี่ 2ω หรือ ความถี่เป็นสองเท่าของลำรังสีที่ชน เทคนิคนี้จึงนำมาผลิตแหล่งกำเนิดเลเซอร์ความยาวคลื่นสั้น เช่น เลเซอร์ Nd: YAG 1064 นาโนเมตร เมื่อใช้เทคนิคนี้โดยให้รังสี 1064 นาโนเมตรผ่านตัวกลางผลึกโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต จะได้รังสี 532 นาโนเมตร และมีปริมาณร้อยละ 30 ของรังสีที่ชน ถ้าให้รังสี 532 นาโนเมตร ผ่านผลึกแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจะได้รังสีอัลตราไวโอเล็ต 266 นาโนเมตร (ความถี่เพิ่มสองเท่า หรือ ความยาวคลื่นลดลงครึ่งหนึ่ง) รังสีจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ให้เฉพาะความยาวคลื่นนิยมใช้กับเครื่องสเปกโทรแบบไม่เชิงเส้น (ต้องการเฉพาะความยาวคลื่น) เช่น ใช้กับเครื่องรามัน

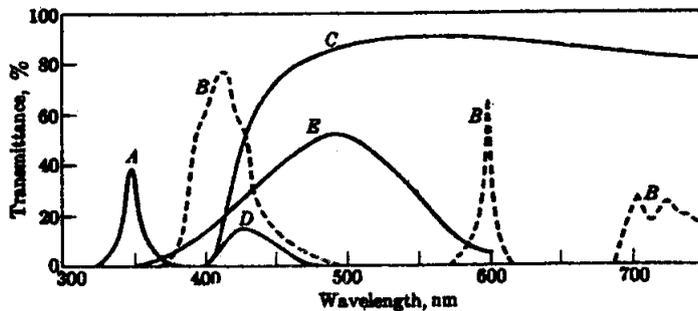
อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น Wavelength Selector ฟิลเตอร์ Filter

การวิเคราะห์โดยวิธีสเปกโทรใช้รังสีช่วงความยาวคลื่นแคบๆหรือแถบความยาวคลื่น แถบความยาวคลื่นแคบๆ ช่วยเพิ่มสภาพไวในการวัดความดูดกลืนและการเปล่งรังสี อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นมีสองชนิด ฟิลเตอร์และตัวทำแสงเอกรงค์ (Monochromator)

ฟิลเตอร์ทำหน้าที่ดูดกลืน สะท้อน หรือเบนความถี่รังสีส่วนใหญ่ แล้วยอมให้แถบหรือช่วงความยาวคลื่นของรังสีแคบๆ ผ่าน ดังรูป 3-11 แสดงความส่องผ่านรังสีจากฟิลเตอร์ชนิดต่างๆ ฟิลเตอร์ A, B หรือ D ให้รังสีช่วงแคบๆผ่านออกมา จึงใช้เส้นการเปล่งรังสี หรือ แยกแถบรังสีช่วงแคบๆ ที่ออกจากแหล่งกำเนิดรังสีต่อเนื่อง ฟิลเตอร์ C เป็นคัทออฟฟิลเตอร์ใช้กันบางส่วนของสเปกตรัม ฟิลเตอร์ A และ B แถบความกว้างสเปกตรัม

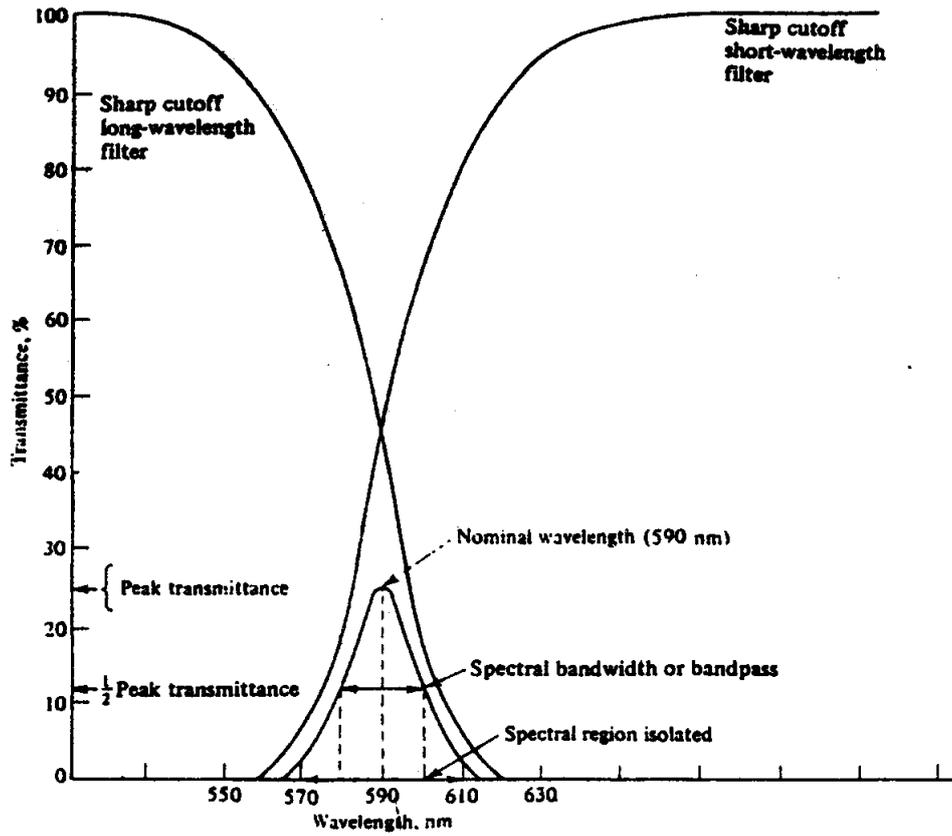
(spectra band width or bandpass) ประมาณ 10 นาโนเมตร แอปซอร์ปชันฟิลเตอร์ (ฟิลเตอร์ดูดกลืน) แก้วมีแถบความกว้างสเปกตรา 40 นาโนเมตร

แอปซอร์ปชันฟิลเตอร์ทำจากแก้วสี หรือ สีข้อม ที่แขวนลอยในเจลาตินที่มีแผ่นแก้วสองชิ้นประกบอยู่ ฟิลเตอร์แก้วนิยมนำใช้กับอุปกรณ์เปรียบเทียบสี ฟิลเตอร์นี้ใช้งานในช่วงสเปกตรัมวิสิเบิล ฟิลเตอร์ที่ใช้หลักการการกระเจิงขึ้นกับผลึกที่ติดอยู่กับแก้ว รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นถูกกระเจิงและถูกดูดไว้ ขณะที่รังสีที่มีความยาวคลื่นยาวผ่านออกมา ฟิลเตอร์ที่ใช้หลักการดูดกลืน ได้แก่ คัทออฟ (cut off หรือ sharp cut) ฟิลเตอร์นี้ทำหน้าที่ลดอันดับสเปกตราที่ไม่ต้องการออกจากอินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์และดิฟแฟรกชันเกรตติง (เกรตติงที่เลี้ยวเบนรังสี) ฟิลเตอร์หนึ่งจุดจะมีฟิลเตอร์ตัดความยาวคลื่นสั้น (sharp cut off short wavelength) ให้เฉพาะรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวผ่านออกมา (ให้รังสีสีแดง หรือ เหลือง) ส่วนฟิลเตอร์ที่ตัดรังสีที่มีความยาวคลื่นยาวออก (sharp cut off long wavelength) ให้รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นผ่านออกมา (รังสีสีน้ำเงินเหลือง) ดังรูป 3-12 ฟิลเตอร์สองชุดนี้ให้ความกว้างสเปกตรา 20 ถึง 70 นาโนเมตร รังสีที่ผ่านออกมามีค่าร้อยละ 5 ถึง 20 และมีปริมาณน้อยกว่าอินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์แก้วชนิดต่างๆ

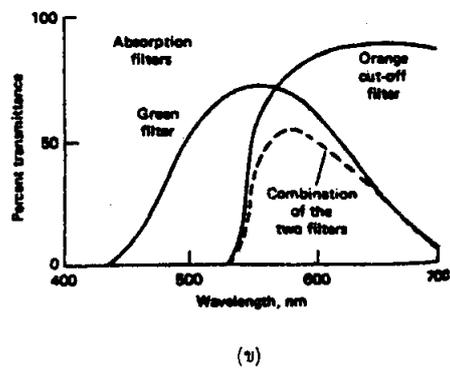
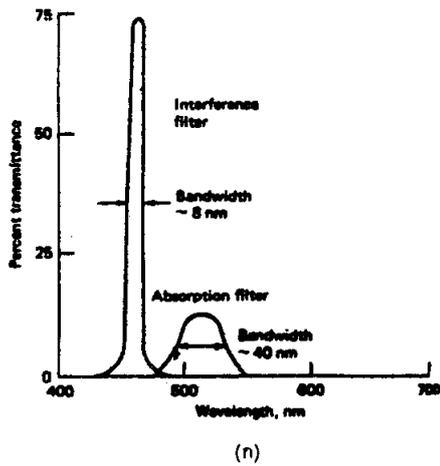


รูป 3-11 ความส่งผ่านรังสีของฟิลเตอร์ชนิดต่างๆ

- A แฟบริย์แพร์ริอต (แถบความยาวคลื่นของรังสีอันดับหนึ่งที่ 700 นาโนเมตร ถูกกั้นไว้)
- B อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์ที่มีชั้น โปร่งแสงหลายชั้น ให้แถบรังสีอันดับหนึ่ง 595 นาโนเมตร
- C ชาร์ปคัทออฟฟิลเตอร์ คอร์นิ่ง 3389
- D คอร์นิ่งฟิลเตอร์ที่ได้จากการใช้ฟิลเตอร์คอร์นิ่ง 3389 และ 5113 ให้แถบรังสีช่วงแคบออกมา
- E ฟิลเตอร์แก้ว คอร์นิ่ง 4060



รูป 3-12 ความส่องผ่านรังสีของสเปกตราที่ได้จากแอนเชอร์ปชั้นฟิลเตอร์แก้วที่ทำจากฟิลเตอร์ตัดรังสีสองชุด

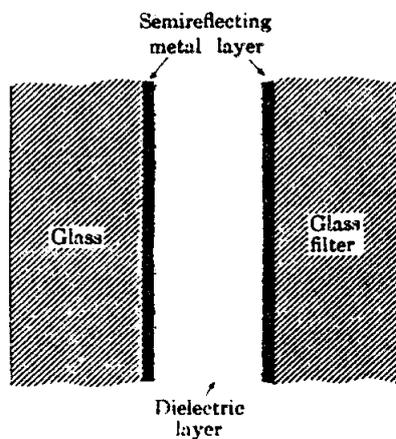


รูป 3-13 การเปรียบเทียบความส่องผ่านรังสีช่วงวิเลเบิลของฟิลเตอร์หลายชนิด

คริสเตียนเสนฟิลเตอร์ (Christiansen filter) เบน (deflect) รังสีส่วนมากที่มีความยาวคลื่นไม่เหมาะสมออกและยอมให้รังสีช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ ที่เหมาะสมออกมา ฟิลเตอร์นี้ทำจากสารแขวนลอยของอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและเป็นของแข็งโปร่งใส มีค่าการกระจาย $d\eta/d\lambda$ ต่างจากของเหลว เมื่อมีรังสีที่มีหลายความยาวคลื่นชนฟิลเตอร์จะมีเฉพาะรังสีที่มีครรชนหักเหเท่ากับครรชนหักเหของของเหลวผ่านออกมา รังสีที่มีความยาวคลื่นอื่นจะเบนออกไป ถ้าใช้ของเหลวสองชนิดที่มีครรชนหักเหต่างกันเล็กน้อย (ใกล้เคียงกัน) รังสีที่ได้จะออกมาเป็นช่วงความยาวคลื่น

อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์ (Interference filter) ฟิลเตอร์นี้ใช้หลักการแทรกสอดระหว่างผิวที่มีการสะท้อนรังสีหลายครั้ง จะให้ช่วงความยาวคลื่น 2,000 ต่อเซนติเมตร (5 ไมโครเมตร) ถึงช่วงใกล้อินฟราเรด อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์มีสองแบบ แบบแรกใช้โลหะหรือแฟบริย์แพร์รอต (Fabry Perot) แบบที่สองใช้ไดอิเล็กตริกหลาย ๆ ชั้น ดังรูป 3-14

แฟบริย์แพร์รอตฟิลเตอร์เป็นชั้นไดอิเล็กตริก (dielectric layer) บางเช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ แคลเซียมฟลูออไรด์ หรือซิลิคอนออกไซด์ อยู่ระหว่างกลางชั้นโลหะกึ่งสะท้อนแสงที่ติดอยู่กับแผ่นแก้ว เช่น เงิน การเคลือบชั้นต่าง ๆ ต้องทำในบริเวณที่มีความดันต่ำ ๆ แผ่นแก้วด้านหนึ่งใช้เป็นฟิลเตอร์ได้เพื่อตัดอันดับรังสีที่ไม่ต้องการออก ฟิล์มเงินแต่ละชั้นทำหน้าที่สะท้อนรังสีประมาณครึ่งหนึ่ง และให้รังสีผ่านครึ่งหนึ่ง เมื่อมีรังสีมาชนมัน ดังรูป



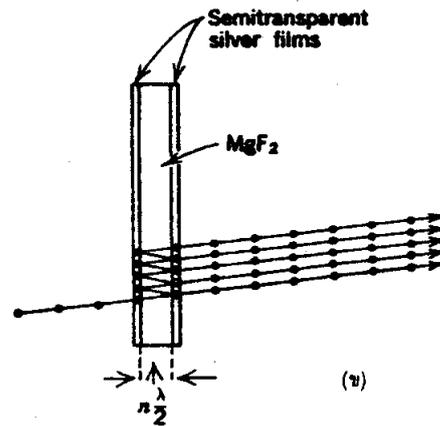
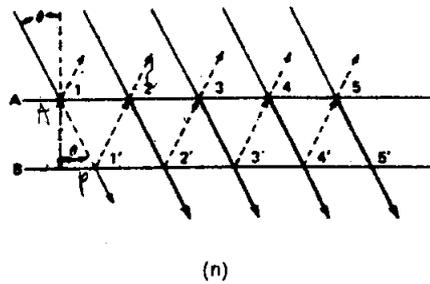
รูป 3-14 พื้นหน้าที่หน้าคคของอินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์ชนิดแฟบริย์แพร์รอต (Fabry Perot) แก้วที่หุ้มอยู่ชั้นนอกหนา 2 ถึง 3 มิลลิเมตร ชั้นไดอิเล็กตริกหนา 0.4 ไมโครเมตร ชั้นฟิล์มโลหะบางมาก ฟิลเตอร์นี้มีฟิลเตอร์แก้วหุ้มอีกเพื่อให้รังสีอันดับที่ต้องการออกมาเท่านั้น

3-15 บางส่วนของลำรังสีที่ตกสู่ฟิล์มเงิน จะเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ กัน แต่บริเวณที่เกิดการสะท้อนรังสีจะมีรังสีผ่านออกมา รังสีต่าง ๆ ที่ออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันได้เมื่อระยะห่างระหว่างฟิล์มเงินมีค่าเท่ากับผลคูณของครึ่งความยาวคลื่น $n\lambda/2$ (n มีค่า 1, 2, 3,...) รังสีที่มีความยาวคลื่นอื่นจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน แอมพลิจูดความยาวคลื่นที่แยกโดยฟิลเตอร์นี้มีความยาวคลื่นแคบและพิคส่งผ่านรังสีมีค่ามากกว่าแอมพลิจูดของรังสีฟิลเตอร์ เมื่อใช้ฟิลเตอร์นี้แยกรังสีช่วงวิสิเบิล รังสีอินฟราเรดและมากกว่าสอง (ช่วงอัลตราไวโอเล็ต) แยกได้โดยใช้แผ่นฟิลเตอร์แก้ว (glass filter)

รูป 3-12 เมื่อมีลำรังสีตกสู่อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์ทำมุม θ กับเส้นปกติของฟิลเตอร์ถ้า t เข้าใกล้ศูนย์ สมการที่ได้จากรูปนี้เขียนได้เป็น

$$n\lambda' = 2t \quad \dots\dots(3.4)$$

$$\cos\theta = \frac{t}{AP} \quad AP + PC = \frac{2t}{\cos\theta}$$



รูป 3-15 (ก) และ (ข) ทางเค้นรังสีที่อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์

รูป 3-15 (ก) ที่จุดที่หนึ่ง รังสีชนฟิล์มกึ่งโปร่งแสงที่มุม θ จากเส้นตั้งฉาก รังสีบางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนผ่านเข้าไป กระบวนการเช่นนี้เกิดที่จุดที่สอง ที่ 1' และ 2' และจุดอื่น ๆ ก็เกิดเช่นกัน การแทรกสอดแบบเสริมกันของรังสีจะเกิดขึ้นที่จุดที่สองเมื่อระยะทางของรังสีที่เดินทางจาก 1 ถึง 1' และ 1' ถึง 2 ต้องเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นในตัวกลาง ดังนั้น ระยะทางที่รังสีเดินทางระหว่างชั้น AB มีค่า $2t/\cos\theta$ การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดเมื่อ

$$n\lambda' = \frac{2t}{\cos\theta}$$

$$n\frac{\lambda'}{2} = t/\cos\theta \quad (n \text{ เลขจำนวนเต็ม})$$

(ข) อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์ 0 แทนยอดคลื่น • แทนท้องคลื่นเมื่อ $n = 1$

λ' ความยาวคลื่นของรังสีในชั้นตัวกลางโปร่งแสง t ความหนาของตัวกลางโปร่งแสง λ ความยาวคลื่นของรังสีในอากาศ

$$\lambda = \lambda' n$$

n ครรชนนี้หักเห ความยาวคลื่นของรังสีที่ผ่านออกมาจากฟิลเตอร์

$$\lambda = \frac{2tn}{n} \dots\dots(3.5)$$

n อันดับของการอินเทอร์เฟอเรนซ์ ชั้นฟิลเตอร์แก้วใช้ดูดกลืนรังสีที่ไม่ต้องการ และยอมให้รังสีอันดับหนึ่งเท่านั้นผ่านออกมา

ฟิลเตอร์ลิ้ม (Wedge filter) ฟิลเตอร์นี้ให้รังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกมา ชั้นไดอิเล็กตริกมีรูปร่างคล้ายลิ้มและอยู่ระหว่างชั้นโลหะกึ่งสะท้อนแสง แต่ละจุดบนฟิลเตอร์จะให้รังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกัน (ขึ้นกับความหนาชั้นไดอิเล็กตริก) รังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกันแยกจากกันโดยการผ่านช่องเล็กยาวที่อยู่หลังฟิลเตอร์ ฟิลเตอร์นี้ใช้กระจายรังสีช่วงวิสิเบิล 400 ถึง 700 นาโนเมตร และช่วงใกล้อินฟราเรด (1000 ถึง 2000 นาโนเมตร) ฟิลเตอร์นี้ใช้แทนปริซึมหรือเกรตติงในตัวทำแสงเอกกรงก็ได้

ฟิลเตอร์ที่มีหลายชั้น (Multilayer filter) อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์ชนิดนี้มีชั้นไดอิเล็กตริกที่มีค่าครรชนนี้หักเหต่างกัน (ครรชนนี้หักเหมากหรือน้อย) เคลือบเป็นชั้นบาง ๆ สลับกันและมีความหนาเหมาะสมอยู่ระหว่างชั้นโลหะกึ่งสะท้อนแสงที่ติดกับแผ่นแก้ว ชั้นไดอิเล็กตริกที่เคลือบมี 5 ถึง 25 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนา $\frac{1}{4}$ และ 1 ความยาวคลื่น การเคลือบชั้นต่าง ๆ ต้องทำในบริเวณที่เอาอากาศออก (ความดันต่ำ) ฟิลเตอร์นี้ให้แถบสเปกตรัมแคบมากโดยแถบความกว้างสเปกตรามีค่า 4 ถึง 8 นาโนเมตร และให้ปริมาณแสงผ่านมาร้อยละ 40 ถึง 70 ข้อเสียของฟิลเตอร์แบบนี้ราคาแพง ให้ช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ไม่ต้องการมาก ฟิลเตอร์แบบแฟบริย์แพร์อตจึงนิยมกว่า

ตัวอย่าง อินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์อันหนึ่ง ค่าครรชนนี้หักเหของชั้นไดอิเล็กตริกมีค่า 1.40 ความหนาชั้นไดอิเล็กตริก 190 นาโนเมตร รังสีที่ออกมาแต่ละอันดับมีความยาวคลื่นเท่าใด

$$n\lambda = 2tn$$
$$\lambda = \frac{2tn}{n}$$

$$= \frac{2 \times 190 \text{ นาโนเมตร}}{n} \times 1.40$$

$$= \frac{532}{n} \text{ นาโนเมตร}$$

ตัวอย่าง จะต้องใช้ความหนาชั้นไดอิเล็กทริกของอินเทอร์เฟอเรนซ์ฟิลเตอร์เท่าไร เมื่อต้องการรังสีอันดับที่มีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ชั้นไดอิเล็กทริกเป็นแคลเซียมฟลูออไรด์ $n = 1.35$

$$\lambda = \frac{2t\eta}{n}$$

$$2t = \frac{500 \text{ นาโนเมตร} \times n}{1.35}$$

$$t = 185 \text{ นาโนเมตร}$$

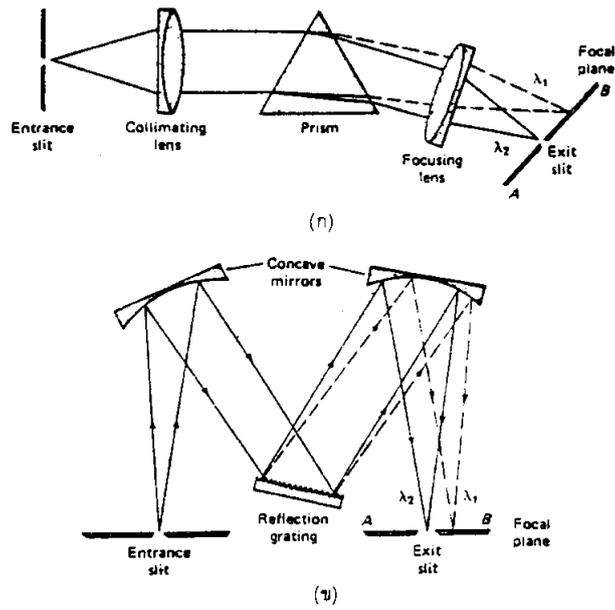
ฟิลเตอร์นี้ยังให้แถบอันดับสองที่มีความยาวคลื่น 250 นาโนเมตร และอันดับสาม 167 นาโนเมตร และอื่น ๆ

อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น (Wavelength Selectors) ตัวทำแสงเอกรงค์ (Monochromators) วิธีสเปกโทรสโกปิก ต้องมีอุปกรณ์แปรความยาวคลื่นของรังสีต่อเนื่องให้ช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ

ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้กับรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลและอินฟราเรดใช้กับอุปกรณ์เชิงกลเหมือนกัน เว้นแต่ว่าวัสดุที่ใช้ในช่วงความยาวคลื่นต่างกันต้องมีสมบัติต่างกัน ดังรูป 3-2 (ข) และ (ค)

องค์ประกอบของตัวทำแสงเอกรงค์ (Components of a Monochromator)

ตัวทำแสงเอกรงค์ประกอบด้วยช่องเล็กยาวเข้า (entrance slit) เลนส์ที่ทำให้แสงเดินทางในแนวขนาน (collimating lens) หรือกระจกเงาทำหน้าที่ผลิตลำแสงในแนวขนาน ปริซึม (prism) หรือเกรตติง (grating) เป็นวัสดุที่ใช้กระจายแสงและวัสดุรวมแสง ทำหน้าที่รวมภาพ (รังสี) ที่เข้าสู่ช่องเล็กยาวเข้าให้ตกบนระนาบโฟกัส (focal plane) หรือออกสู่ช่องเล็กยาวออก (exit slit) ตัวทำแสงเอกรงค์บางชนิดมีหน้าต่างก่อนช่องเล็กยาวเข้าและออกเพื่อกันฝุ่นและควันจากห้องปฏิบัติการ



รูป 3-16 ตัวทำแสงเอกรงค์สองแบบ

(ก) ตัวทำแสงเอกรงค์บุนเซนปริซึม ($\lambda_1 > \lambda_2$)

(ข) เกรตติงเซอร์นีย์เทอร์เนอร์ ($\lambda_1 > \lambda_2$)

รูป 3-16 เป็นระบบเชิงแสงของตัวทำแสงเอกรงค์สองแบบ แบบแรกเป็นปริซึมแบบที่สองเป็นเกรตติง แหล่งกำเนิดรังสีที่มีสองความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ผ่านเข้าสู่ช่องเล็กยาวเข้า (ช่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าแคบ ๆ) แล้วผ่านเข้าสู่เลนส์รวมแสง รังสีที่ออกจากเลนส์รวมแสงจะชนผิวของวัสดุที่ใช้กระจายแสงที่มุมหนึ่ง ตัวทำแสงเอกรงค์แบบปริซึมรังสีจะเกิดการหักเห (refraction) ที่บริเวณผิวหน้าของตัวกลางสองชนิด ทำให้เกิดการกระจายเชิงมุมของรังสี ตัวทำแสงเอกรงค์แบบเกรตติงการกระจายเชิงมุมเกิดจากการเลี้ยวเบนซึ่งเกิดจากบริเวณผิวที่มีการสะท้อนรังสี รังสีที่ถูกกระจายจะถูกโฟกัสบนระนาบโฟกัส AB โดยรังสี λ_1 และ λ_2 ที่เข้ามาด้วยกันจากช่องเล็กยาวเข้าจะแยกออกเป็นคลื่น λ_1 และ λ_2 ออกสู่ช่องเล็กยาวออก

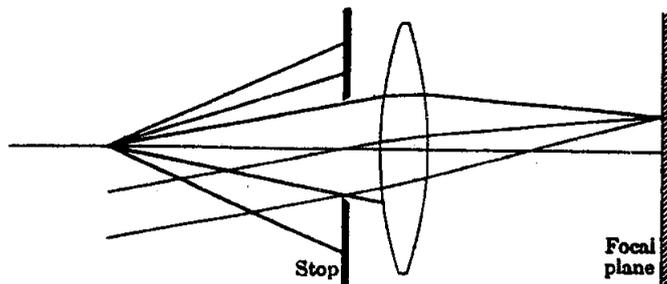
การเกิดภาพ (Image Formation)

เลนส์ กระจกเงาโค้ง และช่อง (aperture) เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบเชิงแสง อุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่รวมการไหลของพลังงานหรือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งหรือกล่าวว่าเป็นที่โฟกัส (รวมแสงเป็นจุดเดียว) และทำให้ลำรังสีเดินทางในแนวขนานหรือลู่ออก (diverge)

การโฟกัส เลนส์และกระจกเงาโค้ง อธิบายได้โดยใช้สมบัติสองข้อ สมบัติข้อแรก ได้แก่ ครรชนนี้หักเห การสะท้อน การคดกมลและความโค้ง (curvature) สมบัติข้อสองได้แก่ การออกแบบระบบเชิงแสงทางด้านคุณภาพ เช่น ความยาวโฟกัส จุดโฟกัส สมบัติข้อนี้ ต้องพิจารณาจากสมบัติข้อแรก

ปกติอุปกรณ์เหล่านี้มีความยาวโฟกัสและคุณภาพแสงคงที่ และทำให้ลำรังสีเป็น ลำรังสีพาร์แอเซียล (paraxial ray) และให้สเปกตรากลวงแคบ สมบัติของลำรังสีพาร์แอเซียล ก) ลำรังสีที่มีมุมขนาดเล็กกับแกนกระฉากหรือเลนส์ ข) ลำรังสีเดินทางใกล้กับแกน สภาพของลำรังสีที่ดีต้องมีความสามารถในการลู่เข้า (convergent) ลำรังสีที่ลู่ออกหรือกระจายถูกกันไว้ไม่ให้ผ่านเข้าสู่เลนส์หรือกระจก ลำรังสีพาร์แอเซียลได้จากการจัดช่องเล็กยาวที่แปรค่าได้ซึ่งวางไว้หน้ากระจกเงาหรือเลนส์ดังรูป 3-17

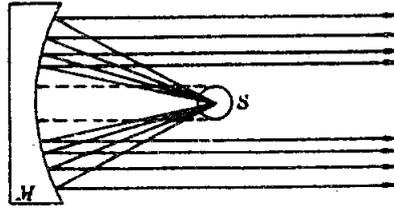
หน้าที่ของเลนส์และกระจกเงาโค้งคือการเกิดภาพ เลนส์หรือกระจกรวมแสงจะทำให้เกิดภาพของวัตถุที่วางไว้หลังจุดโฟกัส เช่น เลนส์ที่ใช้ในการโฟกัสของเครื่องสเปกโตรจะให้ภาพของช่องเล็กยาวเข้า (มีหลายความยาวคลื่น) บนระนาบโฟกัส หลังจากรังสีนี้ชนวัตถุที่ใช้กระจายรังสีออกมาเป็นรังสีช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ ถ้ามีภาพหลายภาพ ความยาวคลื่นรังสีที่ออกมาที่มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน



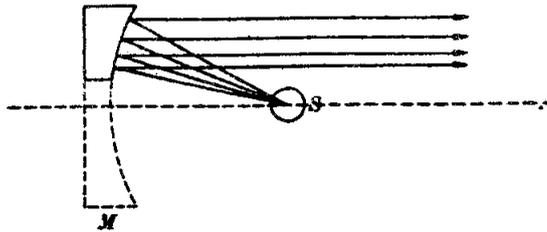
รูป 3-17 การเปิดช่องเล็กยาวแคบ ๆ ระยะห่างภาพที่ปรากฏจะมีค่าเท่ากับความยาวโฟกัส

เมื่อใช้กระจกในเครื่องสเปกโตรต้องกำจัดผลของวัตถุที่อยู่ในทางเดินแสงของกระจกเงา เช่นรูป 3-18 การวางกระจกเงาโค้งเพื่อโฟกัสลำรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีให้ออกมาในแนวขนาน การจัดแบบนี้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์กันช่องเล็กยาวจากแหล่งกำเนิดรังสีที่ผ่านออกมา ถ้าใช้วัตถุที่มีขอบแหลมคมวางแทนแหล่งกำเนิดรังสีอาจมีการเลี้ยวเบนเกิดขึ้น การจัดแบบนี้ไม่ต้องการให้เกิดการเลี้ยวเบนจึงใช้กระจกเงาออฟแอกซ์ (offaxis) ดังรูป 3-19 การจัดแบบนี้รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีจะไม่อยู่ใน (ขวาง) ทางเดินรังสีของกระจก

เงา การจัดตั้งรูป 3-16 ทำให้การทำงานของเครื่องสเปกโทรตีขึ้น เครื่องสเปกโทรอินฟราเรด ส่วนใหญ่มีการจัดอุปกรณ์แบบนี้

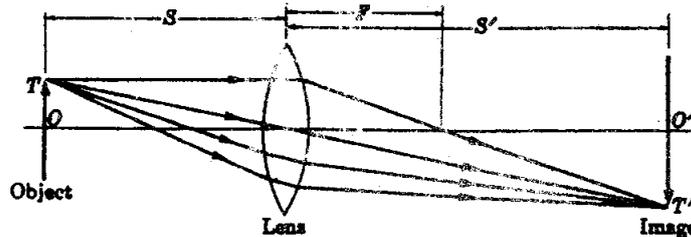


รูป 3-18 การจัดกระจกเงาโค้งเพื่อโฟกัสลำแสงจากแหล่งกำเนิดรังสี ผิวกระจกเงาโค้งส่วนบนยอมให้รังสีในแนวขนานผ่านออกมาเท่านั้น ส่วนตรงกลางกันไม่ให้รังสีออกมา



รูป 3-19 การใช้กระจกเงาออฟแอกซิส (offaxis) กระจกเงาที่ใช้คือบริเวณที่เป็นเส้นทึบ

รูป 3-19 ทางเดินของลำรังสีที่ใช้เลนส์นูน จากจุดหนึ่งของวัตถุหน้าเลนส์นูนให้ภาพปรากฏที่หลังเลนส์นูน ทุกลำรังสีที่ออกจากวัตถุไปยังเลนส์เมื่อออกจากเลนส์จะถูกรวมกันที่จุดเดียว T และให้ภาพหัวกลับที่จุดนี้ ขณะที่มีการลู่ออกจะเกิดการรบกวน ผลที่ได้เป็นจุดที่มีความเข้มมากขึ้นหรือน้อยลงขึ้นกับความสว่างของจุดของวัตถุ การแทรกสอด ทำให้เห็นภาพเป็นจุด จุดที่ได้มีขนาดสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของรังสี



รูป 3-20 จุดที่เกิดภาพ เลนส์มีความยาวโฟกัส F F คือระยะทางจากจุดศูนย์กลางของเลนส์ไปจนถึงจุดที่ลำรังสีในแนวขนานที่ขนานกับแกนเลนส์ (ลำแสงถูกโฟกัส) หรือความยาวโฟกัส ระยะห่างของภาพ s' และระยะห่างวัตถุ S ของเลนส์ที่มีความหนาแน่น ๆ เขียนเป็นสมการได้

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{F}$$

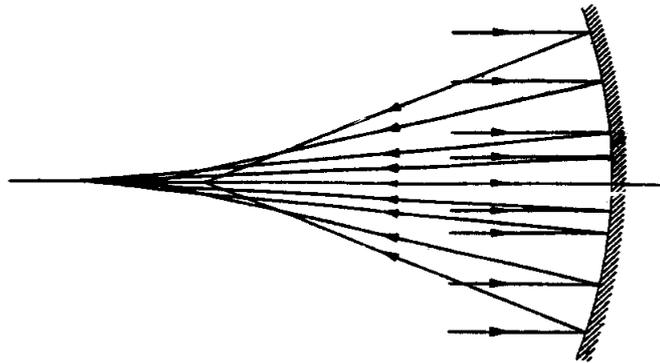
ภาพจะได้รับเมื่อ

1. รังสีทุกความยาวคลื่นจะต้องถูกโฟกัสที่จุดเดียวกัน
2. แต่ละคู่ของลำรังสีที่สมมาตรจากภาพควรถูกโฟกัสที่จุดเดียวกันไม่ว่าลำรังสีจะขนานกับแกนหรือผ่านเข้าไปตรงจุดใดของเลนส์
3. จุดต่าง ๆ ของวัตถุที่อยู่ห่างจากแกนควรถูกโฟกัสเหมือนเป็นจุดที่อยู่ในระนาบเดียวกัน

ความคลาดเชิงแสง (Optical Abberation)

ลำรังสีที่ออกจากตัวทำแสงเอกรงค์มีความคลาดเชิงแสงเนื่องจากวัสดุที่ใช้มีผิวทรงกลมไม่สม่ำเสมอหรือความคลาดทรงกลม (spherical abberation) โคมา ความคลาดเอียง (astigmatism) ความโค้ง (curvature) และความบิดเบี้ยวของลำรังสี (distortion)

ความคลาดทรงกลม รูป 3-21 รังสีที่ได้จากการโฟกัสของกระจกเงาโค้งเป็นจุดหลายจุดบนแกน แต่ละชุดของลำรังสีที่เหมือนกันและขนานกันวิ่งชนกระจกเงาโค้ง ลำรังสีนี้จะถูกโฟกัสบริเวณแนวแกนของกระจกที่ระยะห่างต่างกัน (ภาพที่ได้จึงไม่ชัด) อาการเช่นนี้พิจารณาจากกฎการสะท้อน เมื่อมีรังสีในแนวขนานหลายชุดชนกระจกเงาโค้งจะเกิดการสะท้อน รังสีที่อยู่ห่างจากแกนมากที่สุดจะถูกโฟกัสใกล้กระจกเงามากที่สุด เลนส์ทรงกลมทั่วไปมักเกิดปรากฏการณ์แบบนี้เมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้ลำรังสีที่ถูกรวม (โฟกัส) จะเกิดบริเวณความสว่างเป็นวงใกล้ ๆ กับจุดโฟกัส โดยที่บริเวณสว่างจะไม่เกิดที่จุด ๆ เดียว ผลนี้เรียกวงกลมที่มีความสับสนน้อยสุด (circle of least confusion) อุปกรณ์ที่ใช้ดูภาพต้องวางไว้บริเวณนี้ เช่น เครื่องสเปกโทรที่ไม่มีแก๊สผลของความคลาดทรงกลมบริเวณช่องเล็กยาวออกของตัวทำแสงเอกรงค์มีจุดโต การแยกภาพต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้กันทำไม่ได้

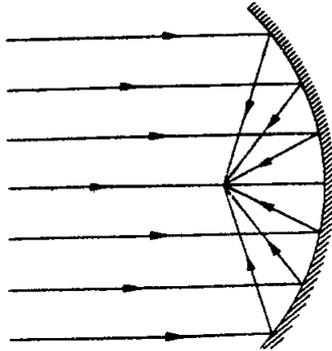


รูป 3-21 ความคลาดทรงกลมจากกระจกเงาโค้ง

การลดผลของความคลาดทรงกลมทำได้โดย

1. โดยลดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเล็กยาวโดยไม่ให้ความสว่างจากแหล่งกำเนิดรังสีลดลง
2. ฝนบริเวณกระจกหรือเลนส์ให้เป็นทรงกลมมากที่สุด หรือ
3. ใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อให้ลำรังสีที่ออกจากตัวทำแสงเอกรงค์ถูกโฟกัสบนจุดเดียวกัน

กระจกเงาเว้าแบบพาราโบล่าจะไม่มีผลจากความคลาดทรงกลมดังรูป 3-22

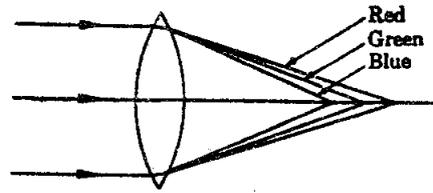


รูป 3-22 การโฟกัสลำรังสีจากกระจกเงาเว้าแบบพาราโบลิก กระจกแบบนี้ไม่มีผลจากการสะท้อนของรังสีจากผิวที่ไม่เป็นทรงกลม

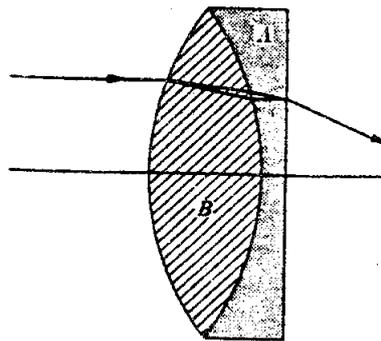
ลำรังสีที่ไม่ขนานกับแนวแกน (offaxial) ทำให้เกิดอาการ โคมา และความคลาดเอียง โคมาคล้ายกับความคลาดทรงกลม ภาพที่เห็นเป็นจุดหลายจุด (ไม่ชัด) ถ้าวัสดุอยู่ห่างจากแนวแกนมาก จะมีการบิดเบี้ยว เรียกความคลาดเอียง จุดที่เกิดภาพแยกเป็นเส้นตั้งฉากสองเส้น ผลนี้เกิดขึ้นแม้ว่าจะอยู่คนละระนาบกัน การโฟกัสลำรังสีให้ได้ผลดีที่สุดควรทำตรงกลางระยะห่างระหว่างสองระนาบเท่ากัน ภาพที่ได้จะมีรูปร่างคล้ายจาน และเป็นวงกลมที่มีความสับสนน้อยสุด

ความคลาดรงค์ (chromatic aberration) รังสีที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกโฟกัสโดยเลนส์อันเดียวกันที่ระยะต่างกัน เนื่องจากค่าดัชนีหักเหของสารเปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น ดังนั้น รังสีที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันจะถูกโฟกัสคนละที่กันเช่น เครื่องสเปกโทรกราฟที่ใช้เลนส์เพียงอันเดียวจะให้ลำรังสีสีเขียวอยู่ระหว่างกลางสเปกตรัมสีอื่น เลนส์นี้ทำหน้าที่รวมแสงจากรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าเล็กน้อยและปล่อยรังสีที่มีความยาวคลื่นมากกว่าเล็กน้อยออกไป อุปกรณ์ที่มีคุณภาพดีใช้เลนส์ที่ทำจากสารสอง

หรือมากกว่าสองชนิดปะกบกันเพื่อกำจัดความผิดพลาดของสองหรือสามความยาวคลื่นที่เลือกใช้ เลนส์ที่ใช้แต่ละส่วนทำจากสารที่มีดรรชนีหักเหและความโค้งต่างกัน รูป 3-23 และรูป 3-24 เป็นการเปรียบเทียบความผิดพลาดของรังค์จากเลนส์ที่ทำจากสารชนิดเดียวและเลนส์ที่ทำจากสารสองชนิด



รูป 3-23 ความคลาดทรงค้ของเลนส์ธรรมดา



รูป 3-24 เลนส์ที่ทำจากสารสองชนิด A เป็นควอร์ตซ์ (n_D 1.54) B ฟลูออไรต์ (n_D 1.43) ไม่มีผลจากการเปลี่ยนสี (ความยาวคลื่น)

ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้กับตัวทำแสงเอกรงค์

(Types of Instruments Employing Monochromator)

การวัดรังสีที่ถูกกระจายโดยตัวทำแสงเอกรงค์มีหลายวิธี เครื่องสเปกโตรแบบง่าย ๆ วัดปริมาณรังสีโดยใช้เลนส์ใกล้ตา (eye piece) หาดำแหน่งบนระนาบโฟกัส ความยาวคลื่นหาได้จากการวัดมุมระหว่างลำรังสีที่ตกกับลำรังสีที่กระจาย เครื่องสเปกโตรกราฟ (spectrograph) ใช้ฟิล์มถ่ายรูปหรือแผ่น (plate) วางบนระนาบโฟกัส ภาพมืดและสว่างที่ออกจากช่องเล็กยาวจะปรากฏบนแผ่นฟิล์มที่วางอยู่ในแนวระนาบโฟกัส

เครื่องสเปกโทร รูป 3-16 ใช้วัสดุกระจายรังสีเป็นแบบเลนส์และเกรตติง อุปกรณ์นี้ความกว้างช่องเล็กยาวออกคงที่และอยู่ตรงระนาบโฟกัส เมื่อมีรังสีที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องผ่านตัวทำแสงเอกรงค์ ความยาวคลื่นของรังสีที่ออกจากช่องเล็กยาวออกจะเปลี่ยนไปตามการหมุนวัสดุที่ใช้กระจายรังสี สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) ใช้ตัวทำแสงเอกรงค์ในการแยกความยาวคลื่นของรังสีและมีอุปกรณ์วัดกำลังแสง โฟโตมิเตอร์ (Photometer) ใช้ฟิลเตอร์ในการแยกความยาวคลื่นของรังสีแบบต่อเนื่อง

ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้ปริซึม (Prism Monochromator)

ปริซึมนิยมใช้ในการกระจายรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลและอินฟราเรดโดยใช้หลักการหักเหรังสีเมื่อรังสีผ่านปริซึม วัสดุที่ใช้ทำปริซึมต่างกันเมื่อต้องการใช้ช่วงความยาวคลื่นของรังสีต่างกัน กำลังการกระจายขึ้นกับค่าดัชนีหักเหที่เปลี่ยนไปเมื่อเปลี่ยนความยาวคลื่น

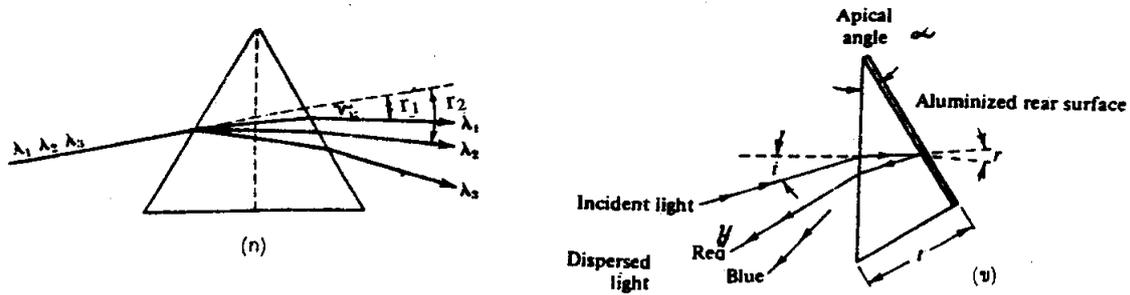
วัสดุที่ใช้ทำหน้าที่ต่าง เลนส์และปริซึมต้องยอมให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจผ่าน ความส่องผ่านรังสีจากวัสดุเหล่านี้ควรได้ร้อยละ 100 แต่จริง ๆ แล้ววัสดุบางชนิดให้รังสีผ่านได้เพียงร้อยละ 20 ดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำหน้าที่ต่างและปริซึมควรมีค่าน้อยเพื่อลดการสะท้อนของรังสีดังสมการ 3-15 ส่วนเลนส์ทำหน้าที่เบี่ยงเบนลำรังสี ต้องใช้วัสดุที่มีค่าดรรชนีหักเหมากเพื่อช่วยลดความยาวโฟกัส ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำเลนส์และหน้าต่างค่าดรรชนีหักเหที่เปลี่ยนแปลงควรมีค่าน้อยเมื่อเปลี่ยนความถี่เพื่อลดความคลาดรังค์ ส่วนปริซึมทำหน้าที่กระจายรังสี ดังนั้น ดรรชนีหักเหต้องเปลี่ยนแปลงมากเมื่อความถี่เปลี่ยน ตัวทำแสงเอกรงค์ที่อยู่ในเครื่องต้องทนต่อการกัดกร่อนโดยบรรยากาศและควันในห้องปฏิบัติการ

ตาราง 3-1 เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในองค์ประกอบของตัวทำแสงเอกรงค์ ช่วงความยาวคลื่นหนึ่งก็เหมาะกับวัสดุชนิดหนึ่ง ช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิลและอินฟราเรด ใช้ปริซึมชนิดควอร์ตซ์ได้ ปริซึมแก้วใช้ในช่วงความยาวคลื่น 350-2000 นาโนเมตร

ตาราง 3-1 วัสดุที่ใช้กับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

วัสดุ	ช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ผ่าน (ไมโครเมตร)	ดัชนีหักเห	การกระจายเชิงมุม	ช่วงใช้งานของปริซึมไมโครเมตร	ความแข็งและความคงทนต่อสารเคมี
ฟิวซ์ซิลิกา	0.18-3.3	1.46	0.52×10^{-4}	0.18-2.7	ดีเลิศ
ควอartz	0.2-3.3	1.54	0.63×10^{-4}	0.2-2.7	ดีเลิศ
แก้วฟลินต์	0.35-2.2	1.60	1.70×10^{-4}	0.35-2	ดีเลิศ
แคลเซียมฟลูออไรด์ (ฟลูออไรด์)	0.12-12	1.43	0.33×10^{-4}	5-9.4	ดี
ลิเทียมฟลูออไรด์	0.12-6	1.39	0.29×10^{-4}	2.7-5.5	ไม่ดี
โซเดียมคลอไรด์	0.13-17	1.54	0.94×10^{-4}	8-16	ไม่ดี
โพแทสเซียมโบรไมด์	0.3-29	1.56	1.45×10^{-4}	15-28	ไม่ดี
ซีเซียมไอโอไดด์	0.3-70	1.79		15-55	ไม่ดี
KRS-5 (TlBr-TlI)	1-40	2.63		24-40	ดี

ชนิดของปริซึมและตัวทำแสงเอกรงค์ปริซึม (Types of Prism and Prism Monochromator)



รูป 3-25 ปริซึม (ก) แก้วควอartz (ข) ลิทโทรว์

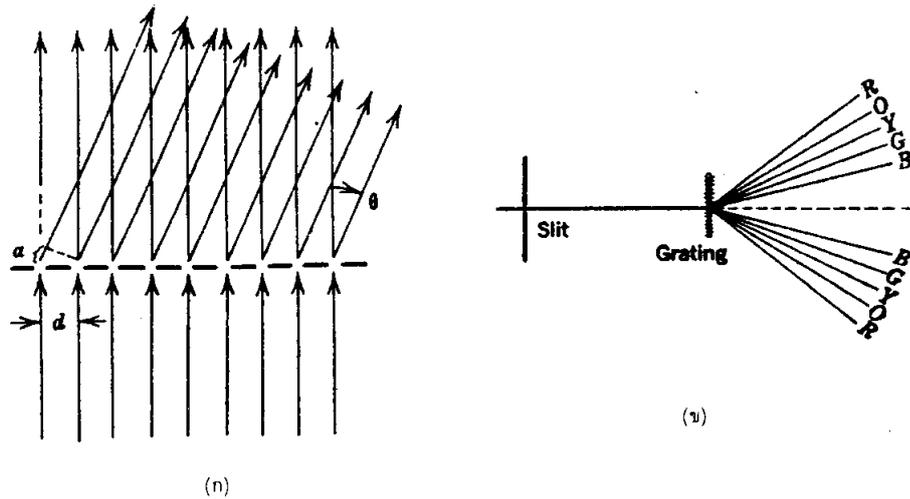
รูป 3-25 เป็นรูปทรงของปริซึมที่นิยมใช้มีสองแบบ ปริซึมมุม 60 องศาที่ทำจากผลึกออปติคัลอินแอคทีฟ (รังสีเดินทางในผลึกด้วยความเร็วเท่ากันทุกทิศทาง) จะหลอมเป็นรูปปริซึม ส่วนปริซึมมุม 60 องศา ที่ทำจากผลึกออปติคัลแอคทีฟ (รังสีเดินทางในผลึกด้วยความเร็วไม่เท่ากัน เพราะผลึกนี้มีค่าดัชนีสองแกนไม่เท่ากัน) ต้องทำจากปริซึมควออร์ตซ์สองอัน แต่ละอันมีมุม 30 องศา โดยนำปริซึมควออร์ตซ์ที่มีแกนตรงข้ามกันมาติดกัน เพื่อกันไม่ให้รังสีที่ออกจากปริซึมเกิดการโพลาไรส์ ปริซึมแบบคอร์นู (cornu prism) รูป 3-25 (ก) เป็นตัวทำแสงเอกรงค์บุนเซน ใช้ปริซึมมุม 60 องศา ทำจากควออร์ตซ์ รูป 3-25 (ข) ปริซึมลิทโทรว์ ปริซึมนี้มีมุม 30 องศาด้านหลังฉาบปรอท การหักเหรังสีเกิดที่ผิวหน้าสองครั้ง การทำงานของลิทโทรว์ปริซึมคล้ายกับปริซึม 60 องศาที่ทำจากการต่อปริซึมมุม 30 องศาเข้าด้วยกัน ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้ลิทโทรว์ปริซึมทางเดินรังสีสั้น การโพลาไรส์รังสีของปริซึมที่ทำจากผลึกออปติคัลแอคทีฟถูกตัดออกโดยรังสีที่ย้อนกลับ

ตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติงที่ใช้แยกความยาวคลื่น

(Grating Monochromators for Wavelength Selection)

การกระจายรังสีช่วงอัลตราไวโอเลต วิสิเบิล และอินฟราเรดทำได้โดยการผ่านลำรังสีที่มีหลายรังสีไปยังเกรตติงชนิดส่งผ่าน (transmission grating) หรือผ่านเกรตติงแบบสะท้อน (reflection grating)

เกรตติงแบบส่งผ่าน เป็นแผ่นแก้วหรือวัสดุโปร่งใสที่ขีดผิวหน้าให้เป็นร่องขนานกัน 2,000 ถึง 6,000 ร่องต่อมิลลิเมตร สำหรับใช้กับรังสีอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล เกรตติงแบบส่งผ่านที่ใช้แยกรังสีอินฟราเรด มีจำนวนร่องน้อยกว่าช่วงไกลอินฟราเรด เกรตติงแบบนี้



รูป 3-26 การเลี้ยวเบน (diffract) ของรังสีสีขาวที่ผ่านเกรตติงแบบส่งผ่าน

ขีดเป็นร่องเพียง 20 ถึง 30 ร่องต่อมิลลิเมตร แต่ละเส้นที่ขีดห่างเท่ากัน เกรตติงแบบนี้ทำได้ยากจึงมีราคาแพง ส่วนเรพลิคาเกรตติง (replica grating) ราคาไม่แพง ทำได้จากการระเหยฟิล์มอะลูมิเนียมบนแม่แบบที่เคลือบด้วยสารกันติด (ลีน) จากนั้นแยกชิ้นงานอะลูมิเนียมออกจากแม่แบบ นำชิ้นงานนี้ไปติดบนแผ่นแก้ว

เมื่อให้ลำรังสีที่มีหลายความยาวคลื่นผ่านแผ่นโปร่งใส (เกรตติงแบบส่งผ่าน) ที่ขีดเป็นร่องจำนวนมากขนานกันและทำหน้าที่แยกลำรังสี รังสีส่วนหนึ่งผ่านออกมาในแนวเส้นตรง ส่วนลำรังสีส่วนอื่นจะเบี่ยงเบนไปจากลำรังสีในแนวเส้นตรง ดังรูป 3-26 เป็นมุม θ มุมนี้ขึ้นกับระยะห่างระหว่างร่องและความยาวคลื่นของรังสี ลำรังสีที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสีชุดที่สองนี้จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันเป็นส่วนใหญ่ มีเฉพาะบางมุมเท่านั้นที่รังสีเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าผลต่างของทางเดินรังสี a ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีระหว่างจุดศูนย์กลางของแต่ละร่องที่อยู่ใกล้กัน มีค่า d ดังนั้น $a = d \sin \theta$ ลำรังสีจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันได้เมื่อผลต่างทางเดินรังสีมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่นของรังสี สมการของทางเดินรังสีที่ได้จากเกรตติง

$$n\lambda = d \sin \theta \quad \dots\dots(3.6)$$

n เลขจำนวนเต็ม 0, 1, 2, 3 เรียกอันดับ λ เป็นความยาวคลื่น

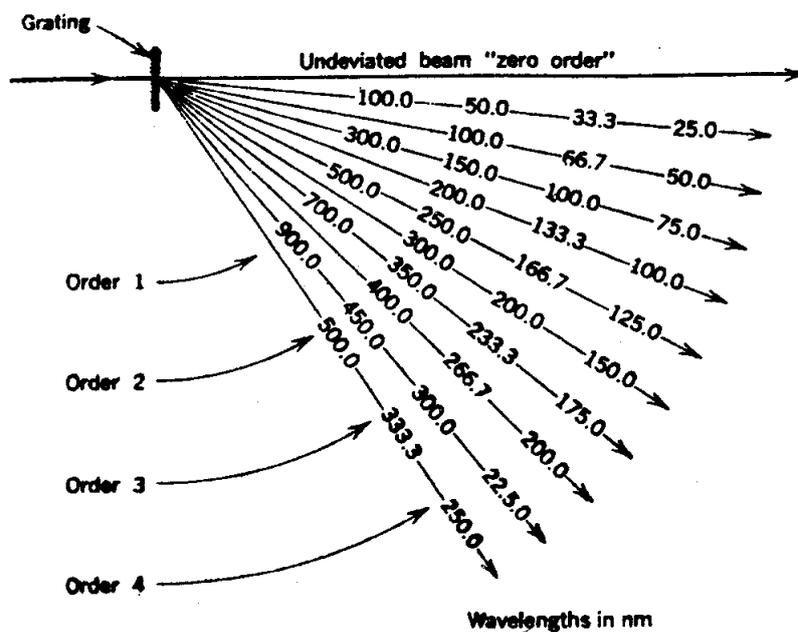
ถ้าลำรังสีที่มีหลายความยาวคลื่นผ่านเกรตติงแบบส่งผ่าน ลำรังสีนี้จะเกิดการเบี่ยงเบนออกมาเป็นชุดสเปกตร้า ดังรูป 3-27 แต่ละร่องของเกรตติงจะให้ชุดสเปกตร้าออกมาเช่นกัน (ชุดสเปกตร้าสมมาตรกัน) แต่ละร่องที่ให้สเปกตรัมจะมีหลายอันดับความยาวคลื่น ดังนั้น ตรงมุม θ จะมีรังสีหลายความยาวคลื่นออกมาด้วยกัน (รังสีอันดับต่าง ๆ)

ตัวอย่าง เกรตติงแบบส่งผ่านชนิดหนึ่งขีดเป็นร่อง 2,000 ร่องต่อเซนติเมตร (ระยะห่างระหว่างร่อง $1/2,000 = 5 \times 10^{-4}$ เซนติเมตร) จะเบี่ยงเบนเป็นมุม $\theta = 6.00$ องศา รังสีที่ออกมาที่อันดับต่าง ๆ จะมีความยาวคลื่นเท่าใด

$$\begin{aligned} n\lambda &= d \sin \theta \\ \lambda &= \frac{5 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร} \sin 6.00}{n} \\ &= \frac{0.5225 \times 10^{-4} \text{ เซนติเมตร}}{n} \end{aligned}$$

ความยาวคลื่นอันดับต่าง ๆ ของมุม 6.00 องศา

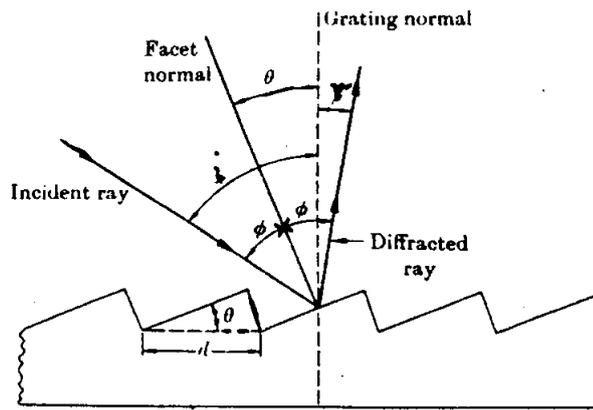
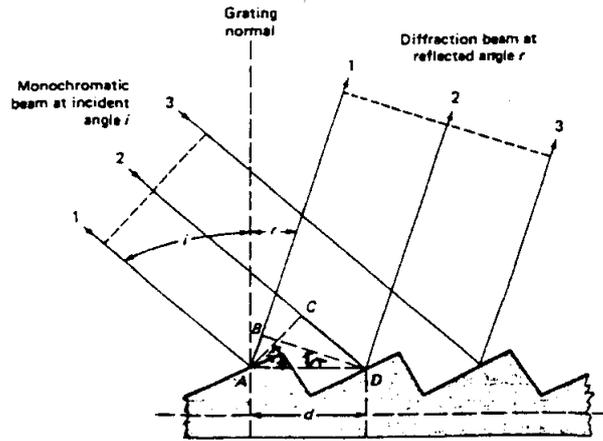
อันดับ (n)	1	2	3	4
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	522.5	261.2	174.2	130.6



รูป 3-27 การซ้อนทับกันของรังสีอันดับต่าง ๆ จากเกรตติงแบบส่งผ่าน

อันดับของสเปกตรอาจเกิดการซ้อนทับกันทำให้เกิดความสับสน ในทางปฏิบัติ สเปกตรัมช่วงวิสิเบิล (400 ถึง 750 นาโนเมตร) หลายอันดับจะไม่ซ้อนทับกัน ถ้าบันทึกสเปกตรัมบนกระดาษกราฟ สภาพไวของสเปกตรจะจำกัดกำลังของการซ้อนทับกัน การซ้อนทับกันอาจลดลงหรือถูกกำจัดโดยการวางปริซึมที่มีความสามารถในการเบี่ยงเบนรังสีเล็กน้อยข้างหน้าเกรตติงเรียกฟอร์ปริซึม (fore prism) หรือออร์เดอร์ซอร์เตอร์ (order sorter) หรือใช้ฟิลเตอร์ชนิดดูดกลืนรังสีเพื่อเอาช่วงสเปกตรัมที่ไม่ต้องการออก

300
321
1
5



รูป 3-28 การเลี้ยวเบนรังสีเมื่อรังสีชนเกรตติงแบบสะท้อนแสง

เกรตติงแบบสะท้อนแสง (reflection grating) นิยมใช้มาก เกรตติงชนิดนี้มีการขีดเป็นร่อง (groove) หรือ (blaze) ของกระจกเงา (โลหะที่ขีดเป็นเงา) หรือแผ่นแก้วที่เคลือบด้วยแผ่นฟิล์มโลหะ เกรตติงนี้ขีดให้เป็นร่องตามมุมที่ต้องการ ด้วยเข็มเพชร ร่องที่ขีดนี้หน้าที่กว้างทำหน้าที่เลี้ยวเบนรังสี ส่วนหน้าแคบไม่มีปฏิกิริยา เกรตติงแบบนี้เรียกเกรตติงเอชเล็ต (Echellet) การจัดแบบนี้ให้ประสิทธิภาพในการเลี้ยวเบนรังสีที่ดีที่สุด เมื่อรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวชนหน้ากว้าง ลำรังสีที่สะท้อนออกมาจากแต่ละร่อง (หน้ากว้าง) จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันได้ เมื่อผลต่างของทางเดินรังสีมีค่าเป็นจำนวนเต็มของความยาวคลื่น ดังรูป 3-28 ลำรังสีในแนวขนานที่มีความยาวคลื่นเดียว 1, 2 และ 3 ชนเกรตติงด้านยาว (หน้าที่กว้าง) ตรงมุมตก i กับเส้นปกติของเกรตติง ลำรังสีจะเกิดการแทรก

สอดแบบเสริมกันมากที่สุดที่มุมสะท้อน r มุม θ (blaze angle) เป็นมุมที่ผิวหน้าของร่องด้านยาวทำกับผิวของเกรตติง และเป็นมุมระหว่างเส้นปกติของเกรตติงกับเส้นปกติของร่อง โดย $(r + \theta) = (i - \theta)$ ลำรังสีที่ 2 เดินทางมากกว่าลำรังสีที่ 1 และมีค่าเท่ากับผลต่างของ $(CD - AB)$ เมื่อเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันผลต่างนี้ต้องมีค่าเท่ากับ $n\lambda$ ทางด้านลำรังสีที่ 2 เดินทางมากกว่าลำรังสีที่ 1 เท่ากับ CD ทางด้านลำรังสีสะท้อนลำรังสีที่ 1 เดินทางมากกว่าลำรังสีที่ 2 เท่ากับ AB การแทรกสอดแบบเสริมกันของรังสีเมื่อผลต่างของทางเดินรังสีมีค่าเท่ากับจำนวนเต็มของความยาวคลื่น

$$n\lambda = CD - AB$$

มุม CAD เท่ากับมุม i มุม BDA เท่ากับมุม r ดังนั้น

$$CD = d \sin i$$

d ระยะห่างระหว่างร่องเกรตติง

$$AB = -d \sin r$$

เครื่องหมายลบแสดงว่ามีการสะท้อนเกิดขึ้น มุม r เป็นลบเมื่ออยู่ด้านตรงข้ามกับมุม i ของเส้นปกติของเกรตติง ดังรูป 3-28 มุม r เป็นบวกเมื่ออยู่ด้านเดียวกับมุม i เมื่อแทนค่า CD และ AB ลงในสมการที่มีการแทรกสอดแบบเสริมกันของรังสีได้

$$n\lambda = d(\sin i + \sin r) \quad \dots\dots(3.7)$$

สมการ (3.3) ค่า λ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนตรงมุม r สำหรับรังสีอันดับหนึ่ง ($n = 1$) มีค่า 800 นาโนเมตร รังสีอันดับสอง ($n = 2$) มีค่า 400 นาโนเมตร และรังสีอันดับสาม ($n = 3$) มีค่า 267 นาโนเมตร รังสีอันดับหนึ่งมีความเข้มสูงสุด เมื่อต้องการเอารังสีอันดับอื่นออกต้องใช้ฟิลเตอร์หรือปริซึมกรองออก

ตัวอย่าง เกรตติงชนิดสะท้อนแสงขีดเป็นร่อง 2,000 ร่องต่อมิลลิเมตร เมื่อได้รับรังสีที่มีหลายความยาวคลื่นตกสู่ผิวเกรตติงทำมุม 48 องศากับเส้นปกติของเกรตติง จงคำนวณความยาวคลื่นของรังสีที่ปรากฏที่มุมสะท้อน + 20, + 10, 0 และ - 10 องศา

$$n\lambda = d(\sin i + \sin r)$$

$$d = \frac{1 \text{ มิลลิเมตร}}{2000 \text{ ร่อง}} = \frac{1 \times 10^6 \text{ นาโนเมตร}}{2000 \text{ ร่อง}}$$

$$= 500 \text{ นาโนเมตรต่อร่อง}$$

$$\lambda = \frac{500 \text{ นาโนเมตร}}{n} (\sin 48^\circ + \sin 20^\circ)$$

$$= \frac{542.6}{n}$$

เมื่อ $r = -10$ องศา

$$\lambda = \frac{500 \text{ นาโนเมตร}}{n} (\sin 48^\circ + \sin(-10^\circ))$$

$$\lambda = \frac{284.7}{n} \text{ นาโนเมตร}$$

ความยาวคลื่นของรังสีเป็นนาโนเมตร λ เมื่อ $i = 48$ องศา

r	n = 1	n = 2	n = 3
20	543	271	181
10	458	229	153
.0	372	186	124
-10	285	142	95

ตัวอย่าง จงหามุมที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีที่มีความยาวคลื่น 3,000 อังสตรอม โดยลำรังสีตกทำมุม ($i = 0$) กับเกรตติงแบบสะท้อนที่ขีดเป็นร่อง 1,180 ร่องต่อมิลลิเมตรโดยรังสีนี้เป็นรังสีอันดับหนึ่ง

$$n\lambda = d(\sin i + \sin r)$$

$$d \sin r = n\lambda - d \sin i$$

$$\sin r = \frac{n\lambda}{d} - \frac{d \sin i}{d}$$

$$= \frac{1 \times 3000 \times 10^{-8} \text{ เซนติเมตร}}{1/1180 \text{ เซนติเมตร}} - \sin 0^\circ$$

$$= 0.354$$

$$r = 20.73 \text{ องศา}$$

ตัวอย่าง รังสีอันดับหนึ่งถูกเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงที่ขีดเป็นร่อง 1,000 ร่องต่อมิลลิเมตรโดยรังสีนี้มีมุมตกกระทบ 30 องศา (ด้านหนึ่งของเส้นปกติของเกรตติง) และมุมสะท้อน 5 องศา (อยู่อีกด้านหนึ่งของเส้นปกติ)

$$n\lambda = d(\sin i + \sin r)$$

$$n\lambda = \frac{1}{1000 \text{ ร่องต่อมิลลิเมตร}} (\sin 30^\circ + \sin(-5^\circ))$$

$$\lambda = 10^{-3} (0.500 - 0.087) \text{ มิลลิเมตร}$$

$$= 4130 \text{ อังสตรอม}$$

$$= 413 \text{ นาโนเมตร}$$

เกรตติงแบบเว้า (concave grating) เกรตติงแบบนี้จะทำหน้าที่เลี้ยวเบนและโฟกัสรังสีให้ออกสู่ช่องเล็กๆยาวออกจึงไม่ต้องใช้เลนส์รวมรังสี

เกรตติงฮอโลกราฟิก (Holographic grating) เทคโนโลยีเลเซอร์ใช้ผลิตเกรตติงบนผิวแก้วระนาบหรือเว้า เกรตติงฮอโลกราฟิกที่ผลิตจากเทคนิคนี้นิยมใช้อุปกรณ์รุ่นใหม่ เกรตติงที่ผลิตด้วยเทคนิคนี้ราคาถูก เกรตติงแบบนี้ไม่มีแสงลอดเข้าไปและภาพซ้อนทับกัน (ผี)

การเตรียมการผลิตเกรตติงฮอโลกราฟิก ใช้ลำเลเซอร์คู่หนึ่งที่มีสมบัติเหมือนกันชนผิวแก้วที่เคลือบด้วยสารต้านแสงด้วยมุมที่เหมาะสม ลำเลเซอร์นี้ทำให้เกิดร่องเคลือบร่องนี้ด้วยอะลูมิเนียมหรือสารสะท้อนแสงจะได้เกรตติงแบบสะท้อนแสง การเปลี่ยนระยะห่างระหว่างร่อง (groove) ทำโดยเปลี่ยนมุมของลำเลเซอร์ทั้งสองที่ชนผิวแก้ว ปกติเกรตติงที่มีร่อง 6000 ร่องต่อมิลลิเมตรผลิตได้โดยใช้เทคนิคนี้

เกรตติงเอชลี (Echelle grating) เกรตติงเอชลีคล้ายกับเกรตติงเอชเล็ท เกรตติงเอชลีมีจำนวนร่องน้อยกว่าเกรตติงเอชเล็ท (เช่น เกรตติงเอชลี 1 มิลลิเมตร มี 80 ร่อง) ใช้ลำรังสีชนร่องหน้าแคบ เพื่อเพิ่มมุมเบสและมุมสะท้อน ลำรังสีที่ชนผิวหน้าแคบทำให้เกรตติงชนิดนี้มีการกระจายดีจึงใช้ในอุปกรณ์ที่วิเคราะห์ธาตุพร้อมกันหลายธาตุโดยใช้หลักการธาตุเปล่งรังสีออกมา รายละเอียดของเกรตติงเอชลีกล่าวไว้ในบทที่ 11

การทำงานของตัวทำแสงเอกรงค์ (Monochromater Performance)

แพ็คเกจที่เกี่ยวข้อกับการทำงานของตัวทำแสงเอกรงค์ มีสามชนิด การแยก (resolution) กำลังการรวมแสง (light gathering power) รังสีที่แยกออกมาบริสุทธิ์เพียงใด (purity of light output) การแยกขึ้นกับการกระจายและความสมบูรณ์ของรังสี (ภาพ) ที่ออกมา ความบริสุทธิ์ของรังสีขึ้นกับปริมาณแสงที่ลอดเข้าไปหรือรังสีที่ถูกกระเจิง อุปกรณ์

ที่มีการกระจายและกำลังการแยกสูงให้รังสีออกมาเป็นแบบเส้น หรือแถบดูดกลืนรังสีชัดเจน รังสีชัดเจน

การกระจาย คือการแยกความยาวคลื่นในอวกาศ (space) หรือกล่าวว่าการกระจาย เป็นการแยกความยาวคลื่นที่อยู่ใกล้กันออกเป็นองค์ประกอบ (component) ความยาวคลื่น ตัวทำแสงเอกรงค์ที่เป็นปริซึม (ปรากฏการณ์การหักเห) หรือเกรตติง (ปรากฏการณ์ การเลี้ยวเบน) ใช้เป็นอุปกรณ์แยกความยาวคลื่นเป็นชุด ๆ

การกระจายของตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติง (Dispersion of Grating Monochromator) ความสามารถของตัวทำแสงเอกรงค์ได้จากการกระจาย การกระจายเชิงมุม (angular dispersion) คือ $dr/d\lambda$ แทนการเปลี่ยนมุมสะท้อนหรือมุมหักเหกับการเปลี่ยนความยาว คลื่น $d\lambda$ มุม r ของเกรตติง ดูจากรูป 3-25 มุม r ของปริซึมดูจากรูป 3-25 และรูป 3-29

การกระจายเชิงเส้น D คือการเปลี่ยนความยาวคลื่นกับระยะทาง (ฟังก์ชัน x) \times แทนระยะตามเส้น AB ของระนาบโฟกัสในรูป 3-16 ดังนั้น

$$D = d \times / d\lambda \quad \text{.....(3.8)}$$

ถ้า F เป็นความยาวโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์ ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายเชิงเส้นกับการกระจายเชิงมุมเขียนเป็นสมการได้

$$D = F dr/d\lambda \quad \text{.....(3.9)}$$

ส่วนกลับการกระจายเชิงเส้น (reciprocal linear dispersion) D^{-1} ก็นิยมใช้เช่นกัน และเขียนเป็นสมการได้

$$D^{-1} = \frac{d\lambda}{dx} = \frac{1}{F} \frac{d\lambda}{dr} \quad \text{.....(3.10)}$$

D^{-1} เขียนในหน่วยนาโนเมตร หรือ อังสตรอมต่อมิลลิเมตร

การกระจายเชิงมุมของเกรตติงได้จากการหาอนุพันธ์จากสมการ $n\lambda = d(\sin i + \sin r)$ โดยให้มุม i มีค่าคงที่

$$\frac{dr}{d\lambda} = \frac{n}{d \cos r} \quad \text{.....(3.11)}$$

แทนค่าความสัมพันธ์นี้ลงในสมการ 3.9 ส่วนกลับการกระจายเชิงเส้นของตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติงเขียนได้เป็น

$$D^{-1} = \frac{d\lambda}{dx} = \frac{d \cos r}{nF} \quad \text{.....(3.12)}$$

จากสมการนี้เห็นว่า การกระจายเชิงมุมเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่าง (d) ระหว่างร่องที่ขีดลดลงหรือจำนวนร่องต่อมิลลิเมตรเพิ่มขึ้น เมื่อมุมเลี้ยวเบนมีค่าน้อย (น้อยกว่า 20 องศา $\cos r \approx 1$ สมการ 3.11 เขียนได้เป็น

$$D^{-1} = \frac{d}{nF} \quad \dots\dots(3.13)$$

นั่นคือ การกระจายเชิงเส้นของตัวทำแสงเอกรงค์ชนิดเกรตติงมีค่าคงที่ ทำให้การออกแบบตัวทำแสงเอกรงค์ชนิดเกรตติงทำได้ง่าย

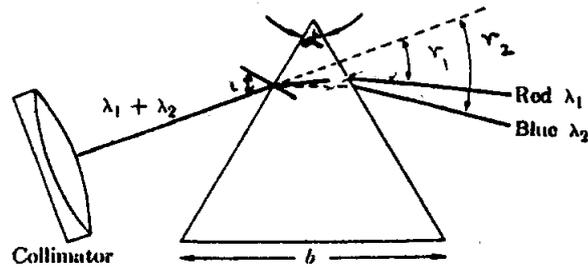
การกระจายของปริซึม (Dispersion by Prism) ขึ้นกับมุมตกของปริซึม รังสีที่ได้จากปริซึมที่มีมุม 60 องศา มักใช้ตรงที่มีการเบี่ยงเบนมุมน้อย ๆ (angle of minimum deviation) r_2 ดูจากรูป 3-29 ลำรังสีสองความยาวคลื่นวิ่งชนปริซึมโดยทำมุมตกกับปริซึม i มุม i คือมุมที่ลำรังสีชนในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าปริซึม (เส้นปกติของปริซึม) รอยต่อระหว่างอากาศกับปริซึม เพื่อที่จะลดความคลาดเอียงของปริซึมและให้ได้ผลดี ลำรังสีที่ชนควรวิ่งมาในแนวขนานกันและผ่านเข้าไปในปริซึม โดยมีลำรังสีที่วิ่งในปริซึมขนานกับฐานปริซึม ลำรังสีควรผ่านเข้าไปในปริซึมที่สมมาตรเพื่อให้ลำรังสีที่เข้าและออกทำมุมที่ผิวเท่ากัน ภาของช่องเล็กยาวเข้าฉายเต็มช่องเล็กยาวออกโดยลำรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นจะเบี่ยงเบนมากกว่าลำรังสีที่มีความยาวคลื่นยาว การกระจายความยาวคลื่นของปริซึมไม่เป็นแบบเชิงเส้น ปริซึมควอร์ตซ์ที่มีความยาวโฟกัส 600 มิลลิเมตร ส่วนกลับการกระจายเชิงเส้นมีค่า 0.6 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร ที่ 230.0 นาโนเมตร 1.04 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร ที่ 270.0 นาโนเมตร 1.56 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร ที่ 310.0 นาโนเมตร 2.9 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร ที่ 370.0 นาโนเมตร 5.4 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร ที่ 450.0 นาโนเมตร และ 12.0 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร ที่ 600.0 นาโนเมตร ปริซึมที่ทำจากแก้วฟลินต์ มีการกระจายดีกว่าปริซึมควอร์ตซ์ หรือฟอสซิลิกาสามเท่า ปริซึมที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกันมีค่าการกระจายต่างกัน เมื่อต้องการรังสีช่วงใดต้องเลือกวัสดุที่ใช้ทำปริซึมให้เหมาะสม

มุมที่รังสีถูกเบี่ยงเบนน้อยที่สุด (r_2) หาได้จากสมการ

$$n = \frac{\sin(r_2 + \alpha)/2}{\sin \alpha/2} \quad \dots\dots(3.14)$$

r_2 คือมุม θ ที่ได้จากรังสีที่เดินทางในปริซึมขนานกับฐานปริซึม α มุมยอดของปริซึม n ดรรชนีหักเหที่ใช้ทำปริซึม เมื่อใช้ปริซึมตรงที่มีการเบี่ยงเบนน้อยสุด รังสีที่แยกออกมาจะดีที่สุดเพราะความคลาดเอียงไม่เกิดขึ้น การสะท้อนภายในผิวปริซึมมีน้อย ปริมาณ

รังสีของความยาวคลื่นที่ต้องการมาก ส่วนแสงที่ลอดเข้ามา (stray light) ที่เกิดจากการสะท้อนภายในมีน้อย (internal reflection)



รูป 3-29 การกระจายรังสีโดยปริซึมมีมุมยอด α ฐานยาว b รังสีสีน้ำเงินมีการกระจายเชิงมุมมากที่สุด

การกระจายเชิงมุมของปริซึม (Angular Dispersion of Prism) คืออัตราการเปลี่ยนมุมสะท้อนหรือมุมหักเหของรังสีที่ชนและรังสีที่ออก (มุม r_2 ของรูป 3-29) กับความยาวคลื่นที่เปลี่ยนหรือ $dr/d\lambda$ ความบริสุทธิ์ของสเปกตราที่ได้จากรังสีที่ออกมาจากตัวทำแสงเอกรงค์ปริซึมขึ้นกับค่านี้ การกระจายเชิงมุมของปริซึมแยกออกเป็นสองส่วน dr คือการเปลี่ยนมุมสะท้อนหรือมุมหักเหของรังสีที่ชนและรังสีที่ออก $dr/d\eta$ แทนการเปลี่ยนมุม r

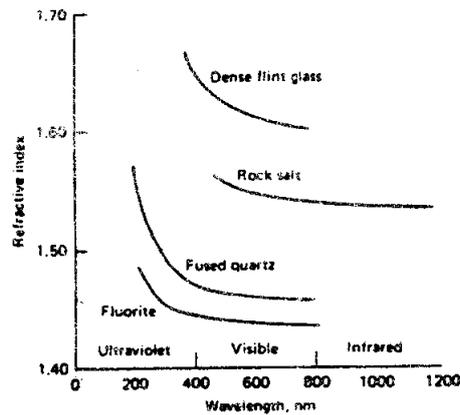
$$\frac{dr}{d\lambda} = \frac{dr}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{d\lambda} \quad \dots\dots(3.15)$$

เมื่อดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำปริซึมเปลี่ยน $d\eta/d\lambda$ แทนการเปลี่ยนค่าดรรชนีหักเหกับความยาวคลื่นที่เปลี่ยน การกระจาย $d\eta/d\lambda$ ขึ้นกับสารที่ใช้ทำปริซึม ขนาดของ $dr/d\eta$ หาได้จากรูปทรงของปริซึมและมุมตก i (รูป 3-29) $d\eta/d\lambda$ เรียกการกระจายเชิงแสง $dr/d\eta$ เรียกการกระจายเชิงเรขาคณิต (geometric dispersion) เพื่อเลี่ยงปัญหาภาพซ้อนทับกัน (double image) หรือความคลาดเอียงที่ไม่ต้องการ มุมตกของทางเดินรังสีที่ผ่านปริซึมที่ดีควรได้จากลำรังสีที่เดินทางเกือบเป็นแนวขนานกับฐานปริซึม เมื่อวัดลำรังสีดังนี้ $dr/d\eta$ จะขึ้นกับรูปทรงของปริซึม (α) รูป (3-29) และค่านี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมุม α เพิ่มขึ้น การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนจะลดลงเมื่อ α มีค่าประมาณ 60 องศา ปริซึมที่มีมุม 60 องศา

$$\frac{dr}{d\eta} = \left(1 - \frac{\eta^2}{4} \right)^{-1/2} \quad \dots\dots(3.16)$$

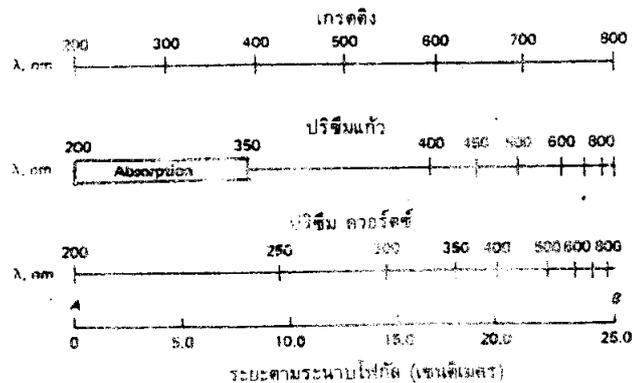
ทำปริซึม วัสดุจะมีการกระจายมากที่สุดเมื่ออยู่ในช่วงการกระจายวิปริต หรือเป็นช่วงที่มีการดูดกลืนสูงสุด การกระจายของสารบางชนิดเหมาะใช้ทำปริซึมดังรูป 3-30 ค่าดรรชนี

หักเหของแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นต่ำกว่า 400 นาโนเมตร หรือเป็นช่วงที่มีการดูดกลืนสูงสุด แก้วจึงใช้ในการวิเคราะห์รังสีต่ำกว่า 350 นาโนเมตรไม่ได้ แต่แก้วก็ดีกว่าควอร์ตซ์ เนื่องจากค่าดรรชนีเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยน ($dn/d\lambda$) จาก 350 ถึง 2000 นาโนเมตร



รูป 3-30 การกระจาย (dispersion) ของวัสดุที่ใช้ในทางเดินแสงหลายชนิด

การกระจายระนาบโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์ปริซึม (Focal Plane Dispersion of Prism Monochromator) เป็นการเปลี่ยนความยาวคลื่นกับฟังก์ชัน x การกระจายเชิงเส้นตามเส้น AB ของระนาบโฟกัสดังรูป 3-16 การกระจายของระนาบโฟกัสมีค่า $dx/d\lambda$



รูป 3-31 การกระจายของตัวทำแสงเอกรงค์ตามชนิด จุด A และ B บนสเกลตรงกับจุดที่แสดงในรูป 3-13

รูป 3-31 เป็นการกระจายระนาบโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์แบบแกรตติง ปริซึมแก้วและปริซึมควอร์ตซ์ การกระจายของปริซึมทั้งสองไม่เป็นแบบเชิงเส้น เมื่อความยาว

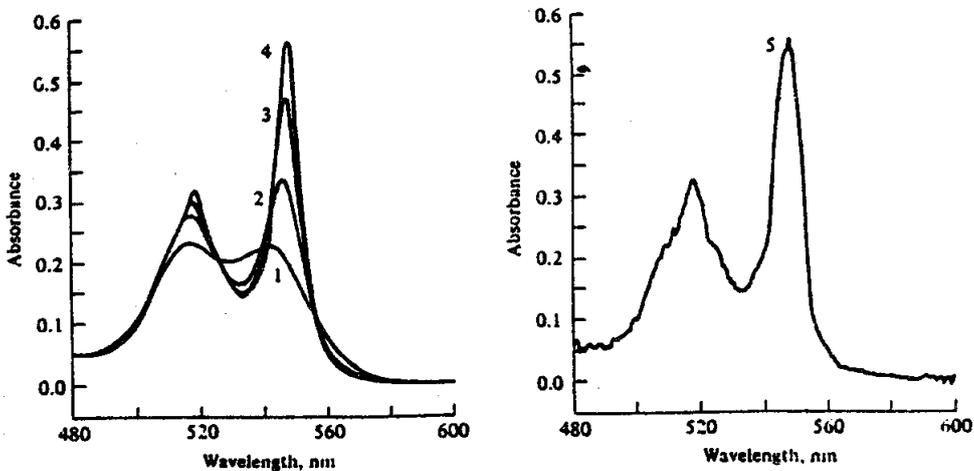
คลื่นมากการกระจายมีค่าน้อย การกระจายของปริซึมในรูปนี้เป็นปริซึมแบบลิทโทรสูง 57 มิลลิเมตร การกระจายที่ได้จากปริซึมแก้วช่วงความยาวคลื่น 350 ถึง 800 นาโนเมตร มีค่ามากกว่าปริซึมควอร์ตซ์ การกระจายของเกรตติงเป็นแบบเชิงเส้นตามระนาบไฟกัล

กำลังการแยกของตัวทำแสงเอกรงค์ (Resolving Power of Monochromator) คือความสามารถที่จะแยกสเปกตราก็ใกล้เคียงกัน เช่น แถบดูดกลืนหรือเส้นที่เกิดจากการเปล่งรังสี การแยกหาได้จากขนาดและสมบัติการกระจายของเกรตติงหรือปริซึม การจัดอุปกรณ์ที่ใช้กระจายรังสี ความกว้างช่องเล็กลง เครื่องบันทึกสัญญาณและอัตราเร็วในการเปลี่ยนความยาวคลื่น

การแยกเขียนเป็นสมการได้

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = W (dr/d\lambda) \quad \dots\dots(3.17)$$

λ ความยาวคลื่นเฉลี่ย $d\lambda$ ผลต่างความยาวคลื่นที่วัดระหว่างเส้นหรือพีคโดยวัดกลางพีค กำลังการแยกแสงของตัวทำแสงเอกรงค์อย่างดีที่ใช้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลอยู่ในช่วง 10^3 ถึง 10^4 ความสามารถในการแยกของตัวทำแสงเอกรงค์ทางปฏิบัติมีค่าน้อยกว่าทางทฤษฎี เนื่องจากผลของการเลี้ยวเบน แถบผ่านของสเปกตรัม (spectra band pass) ที่มีต่อรูปร่างของแถบดูดกลืนของสารที่สนใจ แสดงในรูป 3-32 ถ้ามีการแยกน้อยความสูงของพีคน้อย พีคที่ได้มีความกว้างมาก การแยกแถบดูดกลืนที่อยู่ใกล้กันไม่ดี ถ้ามีการแยก



รูป 3-32 ผลของแถบความกว้างสเปกตรัมที่มีต่อรูปร่างของแถบดูดกลืนรังสีของไซโตโครม C แถบความกว้างสเปกตรัม

- | | | |
|--------------------|-------------------|----------------|
| (1) 20 นาโนเมตร | (2) 10 นาโนเมตร | (3) 5 นาโนเมตร |
| (4) 1 นาโนเมตร และ | (5) 0.08 นาโนเมตร | |

มากความสูงพีคมีค่ามาก ดังนั้น แถบความกว้างสเปกตราที่ดีที่สุดคือ แถบความกว้างสเปกตราที่มีค่าเป็นเศษหนึ่งส่วนสิบของแถบความกว้างของพีคตามธรรมชาติ การเบี่ยงเบนไปจากพีคจริง มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.5

กำลังการแยกของปริซึมแปรโดยตรงกับความยาวของฐานปริซึมและวัสดุที่ใช้ทำปริซึม ซึ่งเขียนเป็นสมการได้

$$R = b \left(\frac{dn}{d\lambda} \right) \quad \dots\dots(3.18)$$

b แทนความกว้างของฐานปริซึม ปริซึมที่มีขนาดใหญ่และทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการกระจายสูงจะมีความสามารถในการแยกดี

กำลังการแยกของเกรตติงขึ้นกับจำนวนร่องที่ขีด เขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$R = nN \quad \dots\dots(3.19)$$

n แทนอันดับการเลี้ยวเบน N แทนจำนวนร่องที่รังสีจากช่องเล็กยาวเข้าวิ่งเข้าชนเกรตติงที่มีขนาดใหญ่และอันดับการเลี้ยวเบนมากจึงมีความสามารถในการแยกดี

ตัวอย่าง จงเปรียบเทียบขนาดของ (1) ปริซึมฟิวส์ซิลิกา มุม 60 องศา (2) ปริซึมแก้ว มุม 60 องศา (3) เกรตติงที่มีร่อง 1200 ร่องต่อมิลลิเมตร ที่ใช้ในการแยกรังสีที่ 460.20 และ 460.30 นาโนเมตร ค่าการกระจายเชิงแสง ($dn/d\lambda$) ของฟิวส์ซิลิกาและแก้วในช่วงความยาวคลื่นนี้ 1.3×10^{-4} และ 3.6×10^{-4} ต่อนาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อใช้ปริซึมแยกรังสี

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = b \frac{dn}{d\lambda}$$

$$b = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \frac{1}{dn/d\lambda} = \frac{460.25}{460.30 - 460.20} \times \frac{1}{dn/d\lambda}$$

$$b = \frac{460.25}{0.1} \times \frac{1}{1.3 \times 10^{-4} \text{ ต่อนาโนเมตร}} \times 10^{-7} \frac{\text{เซนติเมตร}}{\text{นาโนเมตร}}$$

$$= 3.5 \text{ เซนติเมตร}$$

แก้ว

$$b = \frac{460.25}{0.1} \times \frac{1}{3.6 \times 10^{-4}} \times 10^{-7}$$

$$= 1.3 \text{ เซนติเมตร}$$

เมื่อใช้เกรตติงแยกรังสี

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = nN$$

รังสีอันดับหนึ่ง

$$n = 1$$

$$\begin{aligned} N &= \frac{460.25}{0.1 \times n} \\ &= 4.60 \times 10^3 \text{ ร่อง} \end{aligned}$$

ความยาวของเกรตติง

$$\begin{aligned} &= \frac{4.60 \times 10^3 \text{ ร่อง} \times 0.1 \text{ เซนติเมตร}}{1200 \text{ ร่องต่อมิลลิเมตร}} \\ &= 0.38 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

การแยกรังสีนี้ต้องใช้ปริซึมพิวส์ซิลิกาที่มีฐาน 3.6 เซนติเมตร หรือปริซึมแก้วที่มีฐาน 1.3 เซนติเมตร หรือใช้เกรตติงยาว 0.38 เซนติเมตร

ตัวอย่าง การแยกของเกรตติงที่ความยาวคลื่นเฉพาะมีค่าสูงสุดเท่าไร ถ้า R (กำลังการแยก) มีค่าสูงสุด เมื่อ $\sin i + \sin r = 2$

จาก

$$R = nN$$

$$n = \frac{d(\sin i + \sin r)}{\lambda}$$

$$R = \frac{d(\sin i + \sin r)N}{\lambda}$$

$$= \frac{2W}{\lambda}, W \text{ คือความยาวเกรตติงที่ขีดเป็นร่อง}$$

จากสมการนี้ แสดงว่าการแยกขึ้นกับความยาวคลื่น มุมตก มุมเลี้ยวเบน และจำนวนร่องที่ขีดบนเกรตติง เกรตติงยาวจึงใช้กับอุปกรณ์ที่ให้ความละเอียดในการวิเคราะห์สูง มุมตกและมุมเลี้ยวเบนที่มีค่ามากช่วยให้ผลการวิเคราะห์ละเอียดถูกต้องเช่นกัน

กำลังการรวมแสงของตัวทำแสงเอกรงค์ (Light Gathering Power of Monochromator) เมื่อใช้ความกว้างช่องเล็กลงแคบ สเปกตราที่อยู่ใกล้กันแยกจากกันได้ แต่จะมีปัญหาสัญญาณต่อการรบกวนน้อย เนื่องจากปริมาณรังสีเข้าสู่เครื่องตรวจหาน้อย สัญญาณที่วัดได้จึงไม่ต่างจากแบล็คกราวด์ จึงต้องเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวนเพื่อให้พลังงานของรังสี

ชนเครื่องตรวจหามากที่สุดเท่าที่จะมากได้ เลข f (f/number) หรืออัตราเร็ว (speed) ใช้วัดความสามารถของตัวทำแสงเอกรงค์ที่ทำหน้าที่รวบรวมรังสีที่ออกจากช่องเล็กยาวเข้า เลข f เขียนแทนด้วยสมการ

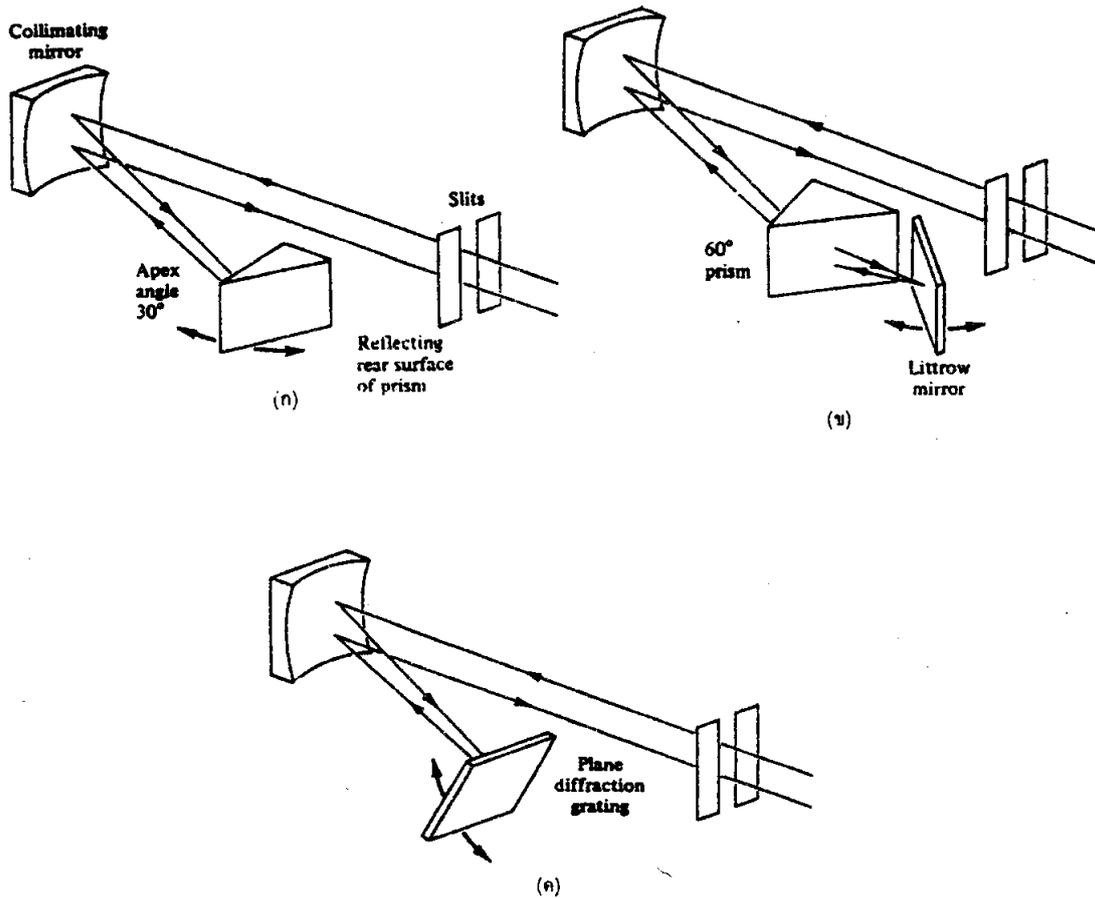
$$f/\text{number} \quad f = F/d \quad \dots\dots(3.20)$$

F ความยาวโฟกัสของกระจกเงาที่ใช้ทำให้รังสีเดินทางในแนวขนานเลนส์ d เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของกระจกเงาโค้งหรือเลนส์ กำลังการรวมแสงของวัสดุเชิงแสงเพิ่มเมื่อ f มีค่าเพิ่ม โดยกำลังการรวมแสงเพิ่มเป็นแบบผกผันกับกำลังสองของเลข f เช่นเลนส์มีเลข f เป็น $f/2$ รวมแสงได้ดีกว่า $f/4$ สี่เท่า ตัวทำแสงเอกรงค์ทั่ว ๆ ไปมีค่า f อยู่ในช่วง 1 ถึง 10

ถ้าต้องการผลละเอียดใช้เลข T (T-number) เลข T คือเลข f ที่แก้ค่าความส่องผ่านของเลนส์ โดยเขียนเป็นสมการได้ เลข $T = \text{เลข } f \text{หารด้วย (ความส่องผ่าน)}^2$ เลข T จึงมีค่ามากกว่าเลข f เสมอ

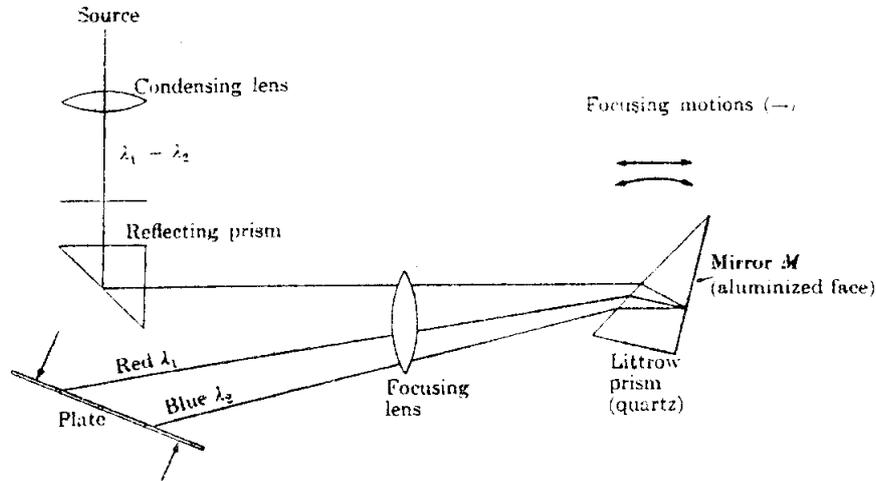
การออกแบบตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้ปริซึมบางชนิด Some Prism Monochromator Design

ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้ปริซึมเป็นพวกลิทโทร่วปริซึมเป็นส่วนใหญ่ การจัดอุปกรณ์ตัวทำแสงเอกรงค์แบบลิทโทร่วมีหลายแบบ ดังรูป 3-33 แบบ (ก) ปริซึมมีมุมยอด 30 องศา ด้านหลังฉาบปรอททำหน้าที่สะท้อนรังสี แบบที่สองปริซึมมีมุมยอด 60 องศา มีกระจกเงา ลิทโทร่วเพิ่มอีกหนึ่งบาน แบบที่สามเกรตติงเลี้ยวเบนรังสี รังสีที่มีหลายความยาวคลื่นจากแหล่งกำเนิดรังสีผ่านสู่กระจกเงาโค้งที่ทำหน้าที่สะท้อนรังสีและโฟกัสรังสีที่ผ่านมาจากช่องเล็กยาวเข้าของตัวทำแสงเอกรงค์ ภาพที่ได้จากช่องเล็กยาวเข้าถูกรวมโดยกระจกเงาเว้าและโฟกัสลำรังสีให้ตกสู่อุปกรณ์กระจายรังสี รังสีที่ถูกหักเหหรือถูกเลี้ยวเบนจะวิ่งชนกระจกแผ่นเดิม แต่คนละตำแหน่งกับลำรังสีที่เข้า รังสีที่ออกมาจะมีช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ วิ่งชนสารตัวอย่างแล้วเข้าสู่เครื่องตรวจหา ช่องเล็กยาวเข้าและออกมีเพียงอันเดียว ด้านบนทำหน้าที่เป็นช่องเล็กยาวเข้า ด้านล่างเป็นช่องเล็กยาวออก ความกว้างช่องเล็กยาวปรับได้ ปริซึมที่มีมุม 30 องศา เลือกความยาวคลื่นโดยหมุนปุ่มปรับความยาวคลื่นที่ต่อกับปริซึม ปริซึมที่มีมุม 60 องศา กระจกเงาชนิดลิทโทร่วที่อยู่หลังปริซึมทำหน้าที่สะท้อนรังสี และให้รังสีผ่านปริซึมเป็นครั้งที่สอง การปรับกระจกเงาโดยเปลี่ยนมุมไปเล็กน้อยมีผลให้ความยาวคลื่นของรังสีที่ออกสู่ช่องเล็กยาวเปลี่ยนไป



รูป 3-33 การจัดอุปกรณ์ตัวทำแสงเอกรงค์แบบลิทโรว์สามแบบ (ก) ปริซึมมุม 30 องศาที่หมุนได้ ด้านหลังฉาบปรอท
 (ข) ปริซึมมุม 60 องศา ด้านหลังมีกระจกลิทโรว์ที่หมุนได้
 (ค) เกรตติงแบบระนาบที่เลี้ยวเบนรังสีและหมุนได้

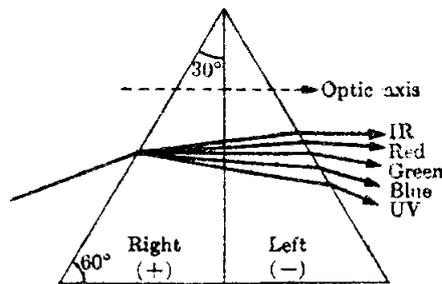
การจัดตัวทำแสงเอกรงค์แบบลิทโรว์ (Littrow Monochromator) รูป 3-34 การจัดแบบนี้มุมของลำรังสีที่ชนปริซึมและมุมของลำรังสีที่ออกจากปริซึมมีค่าเกือบเท่ากัน ข้อดีของการจัดแบบนี้ มีการกระจายมาก ขนาดกะทัดรัด ลำรังสีเดินทางในปริซึมสองครั้ง ใช้เลนส์หรือกระจกเงาโค้งทำหน้าที่ให้ลำรังสีเดินทางในแนวขนานและโฟกัสเพียงอันเดียว ปริซึมที่ทำจากผลึกไอโซทรอปิกรังสีเดินทางในปริซึมด้วยความเร็วเท่ากันทุกทิศทาง การเลือกความยาวคลื่นทำโดยหมุนปริซึมหรือกระจกเงาเพียงอย่างเดียว



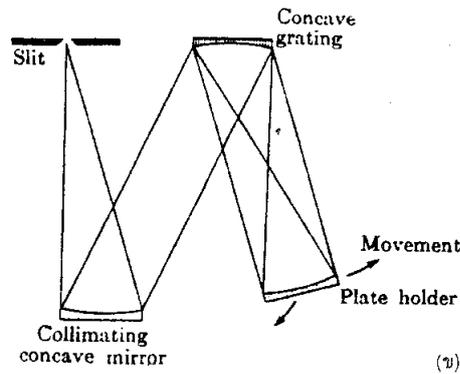
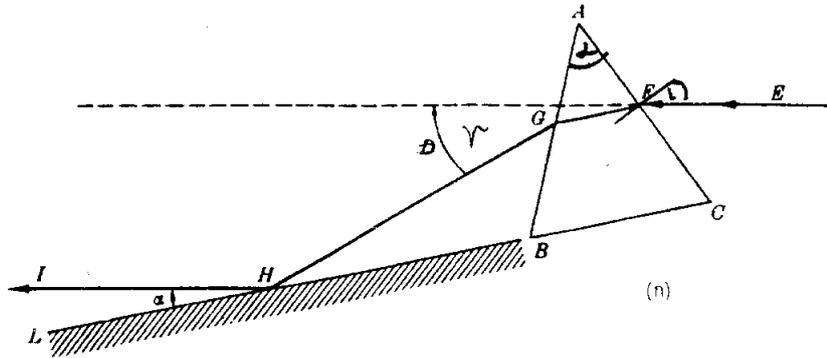
รูป 3-34 การจัดตัวทำแสงเอกรงค์ปริซึม แบบลิทโทรว์ใช้เลนส์หมุน

ส่วนการจัดตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้ปริซึมแบบอื่น ปริซึมที่ใช้เป็นผลึกออกปติกัลลีแอนไอโซทรอปิกจะมีปัญหาเกี่ยวกับรังสีเดินทางในปริซึมด้วยความเร็วไม่เท่ากัน (เซอร์คิวลาร์ดับเบิลแฟรกชัน) ปริซึมที่ใช้ต้องเป็นผลึกไอโซทรอปิก เช่น ฟิวส์ซิลิกา

คอร์นูปริซึม เป็นปริซึมที่มีมุม 60 องศา และเป็นแบบสมมาตร ปริซึมนี้จัดแบบลิทโทรว์ได้ ดังรูป 3-33 หรือจัดแบบวอดเวิร์ท (Wad Worth) ถ้าใช้ปริซึมทำจากควออร์ตซ์ ต้องใช้ปริซึมที่มีมุมยอด 30 องศาสองอัน โดยนำมุมยอดด้านขวาและซ้ายแปะติดกัน ดังรูป 3-35 ปริซึมสองชิ้นทำหน้าที่ชดเชยรังสีกัน และทำให้ไม่เกิดเซอร์คิวลาร์ดับเบิลแฟรกชัน (เซอร์คิวลาร์ไบรฟริงเกนต์) การจัดแบบวอดเวิร์ท แสดงในรูป 3-36 รังสีชนปริซึมตรงที่มีมุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด ข้อดีนี้คือ ลำแสงที่ออกจากกระจกเงา LB (ลำแสง IH) จะเดินทางในแนวขนานกับลำแสงที่เข้า EF การเบี่ยงเบนถูกตัดออกโดยการสะท้อนจากกระจกเงารายที่มีมุม α โดย $r = 2\alpha$



รูป 3-35 ควออร์ตซ์คอร์นูปริซึม ไม่ได้แสดงเซอร์คิวลาร์ดับเบิลแฟรกชันที่เกิดจากปริซึมขวา เนื่องจากผลนี้ได้รับการชดเชยโดยปริซึมซ้าย สเปกตราที่เกิดจากปริซึมซ้ายและขวาคะทับกันสนิท ถ้าปริซึมทั้งสองทำจากควออร์ตซ์ชนิดเดียวกัน



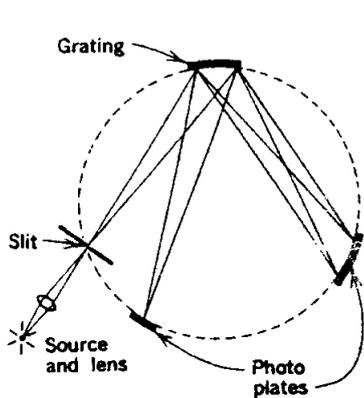
รูป 3-36 (ก) การจัดตัวทำแสงเอกรงค์แบบวาดเวร์ท ลำรังสีที่เข้า EF และลำรังสีที่ออก HI จะขนานกัน ลำรังสีที่ออกจากปริซึมชนปริซึมตรงมุมที่มีการเบี่ยงเบนน้อยที่สุด ABC เป็นปริซึมแบบสมมาตร ผิวหน้าของกระจกเงา LB วางอยู่ในแนวเดียวกับฐานปริซึม เพื่อให้ LBC เป็นเส้นตรง (ข) การจัดตัวทำแสงเอกรงค์แบบวาดเวร์ท โดยใช้เกรตติงแบบโค้ง

การออกแบบตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้เกรตติงบางชนิด Some Grating Monochromator Design

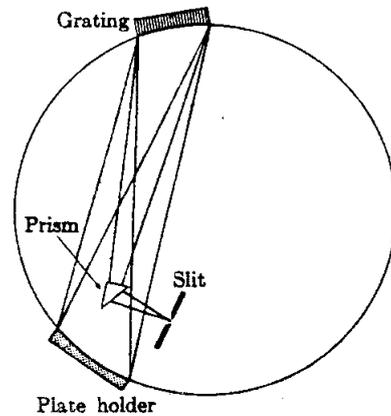
เกรตติงที่ใช้กับเครื่องสเปกโตรกราฟสมัยก่อนใช้เกรตติงแบบเว้า แต่การจัดแบบเว้าทำยาก

เกรตติงแบบเว้า (concave grating) ที่มีการกระจายและการแยกดี ต้องใช้เกรตติงเว้าที่ยาวและขีดเป็นร่องใกล้กันมาก ผิวเกรตติงเว้าทำหน้าที่ให้ลำรังสีเดินทางในแนวขนานและโฟกัสรังสี ดังนั้น ปริมาณรังสีในตัวทำแสงเอกรงค์แบบนี้จึงมีมาก แต่การโฟกัสสเปกตราระหว่างต่างกันให้คงที่ทำได้ยาก การโฟกัสเมื่อเปลี่ยนช่วงสเปกตราต้องเลื่อนช่องเล็ก

ยาวหรือเกรตติง นอกจากนี้เกรตติงแบบเว้ายังมีผลจากความคลาดเอียง และโคมาตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้เกรตติงแบบเว้า มักมีการจัดตัวแบบวงกลมโรว์แลนด์ (Rowland circle) ดังรูป 3-37 เกรตติงแบบนี้มีความยาวโฟกัสมากจึงใช้ในเครื่องที่ต้องการการแยกและการกระจายสูง ตัวทำแสงเอกรงค์แบบนี้มีขนาดใหญ่มุ่มที่อยู่ภายในเส้นที่ลากจากจุดศูนย์กลางเกรตติงไปยังช่องเล็กยาว และจากช่องเล็กยาวไปยังศูนย์กลางฟิล์มรับภาพมีค่า 90 องศาเสมอ ช่องเล็กยาวเกรตติง และฟิล์มรับภาพ จัดให้อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมโรว์แลนด์และมีค่าเท่ากับโฟกัสเคอร์ฟของเกรตติงแบบเว้า วงกลมนี้จึงมีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับรัศมีความโค้งของเกรตติง แต่การจัดแบบนี้ภาพที่ได้จะคลาดเอียง จึงใช้กระจกเงาเว้าใส่เข้าไปอีก 1 อัน เพื่อให้ลำรังสีเดินทางในแนวขนาน ลำรังสีจากช่องเล็กยาวเข้าไปให้เข้าสู่เกรตติงแบบเว้าในแนวขนาน การจัดแบบนี้แสดงในรูป 3-36 ตัวทำแสงเอกรงค์แบบวาดเวร์ทมีขนาดใหญ่ โฟกัสเคอร์ฟไม่เป็นวงกลมภาพที่ได้มีความคลาดเอียง ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้หลักการจัดแบบโรว์แลนด์ แต่มีขนาดเล็กได้แก่ การจัดแบบอีเกิล (Eagle mounting) ดังรูป 3-38 อุปกรณ์ต่าง ๆ อยู่ด้านเดียวกันกับของวงกลมโรว์แลนด์ การจัดแบบนี้คล้ายกับการจัดแบบลิทโทรวิปริซึม ลำรังสีที่ออกจากเกรตติงตกสู่ฟิล์มใกล้ ๆ กับลำรังสีที่เข้า ดังนั้นภาพที่ได้จึงไม่คลาดเอียง การที่มีปริซึมสะท้อนรังสีจากช่องเล็กยาวอีกหนึ่งอันภายในวงกลมโรว์แลนด์ทำให้ลำรังสีจากเกรตติงตกลงบนฟิล์มที่อยู่บนเส้นรอบวง



รูป 3-37 การจัดแบบวงกลมโรว์แลนด์

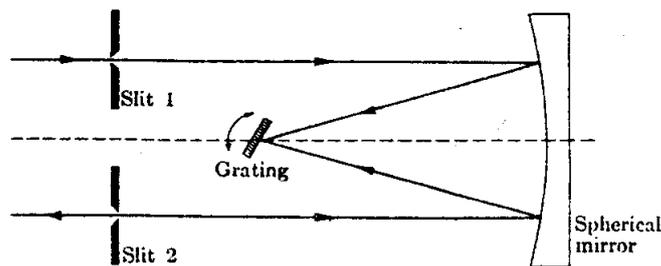


รูป 3-38 การจัดแบบอีเกิล

เกรตติงแบบระนาบ (Plane grating) ดีกว่าเกรตติงแบบเว้า เพราะผิวหน้าเกรตติงขีดเป็นร่องห่างเท่ากันดีกว่า การจัดตัวทำแสงเอกรงค์ของเกรตติงแบบระนาบขนาดกะทัดรัดและทำได้สะดวก การกระจายความยาวคลื่นดีกว่าและการแยกดีแม้ว่าตัวทำแสงเอกรงค์จะมีขนาดเล็ก มุมตกก็มีค่ามากได้ รังสีอันดับ 1 ที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 700 นาโนเมตรสามารถได้จากเกรตติงขนาดเล็กได้

การจัดตัวทำแสงเอกรงค์แบบลิทโทรว์โดยใช้เกรตติงระนาบ (Littrow plane grating mount) การจัดแบบลิทโทรว์ใช้อุปกรณ์โฟกัสและทำลำรังสีให้เดินทางในแนวขนานกับแกนและถูกโฟกัสที่จุดเดียว การจัดแบบนี้ใช้กับเครื่องสเปกโทรขนาดเล็ก แกนการหมุนของเกรตติงระนาบตั้งฉากกับลำรังสี ดังนั้น มุมตกและมุมที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจึงอยู่ข้างเดียวกับเส้นปกติของเกรตติง และมีค่าเกือบเท่ากัน $i = r = \theta$ ตัวทำแสงเอกรงค์ที่จัดแบบนี้ ประสิทธิภาพของเกรตติงมีค่ามาก สเปกตราก็ได้บริสุทธิ์ ลำรังสีไม่ลู่ออกและทางเดินรังสีสั้น ลำรังสีที่เข้าและออกจะผ่านช่องเล็กยาวชุดเดียว แต่คนละด้านกัน ดังรูป 3-33 ความกว้างช่องเล็กยาวเข้าและออกมีค่าเท่ากัน และปรับขนาดค่าความกว้างช่องเล็กยาวตามต้องการได้

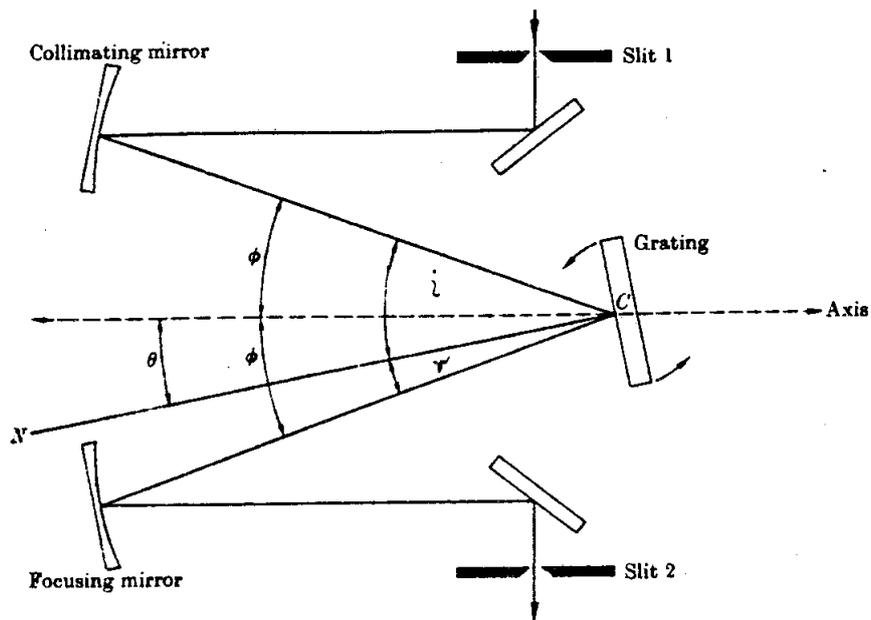
การจัดแบบเออร์เบิต (Erbert mounting) การจัดแบบนี้ เกรตติงระนาบไม่ห้ลำรังสีที่ไม่ต้องการเกิดการกระจาย การจัดแบบเออร์เบิตแสดงในรูป 3-39 ช่องเล็กยาวเข้าและออกอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเกรตติง กระจกเงาโค้งหนึ่งบานทำหน้าที่ให้ลำรังสีเดินทางในแนวขนานและโฟกัสรังสี ลำรังสีออกจากช่องเล็กยาวเข้า (1) เดินทางอยู่ในระนาบโฟกัสของกระจกเงาจนกระจกเงาด้านบน และถูกทำให้ลำรังสีเดินทางในแนวขนาน และถูกสะท้อนไปชนเกรตติงสะท้อนแบบระนาบ รังสีที่เกิดจากการเลี้ยวเบนโดยเกรตติงเดินทางไปชนกระจกเงาโค้งด้านล่างและถูกโฟกัสบนช่องเล็กยาวออก (2) ภาพที่ปรากฏบนช่องเล็กยาวออก (2) จะไม่มีความคลาดรงค์ เพราะว่าการสะท้อนสองครั้งเกิดที่นอกแกน (off axis) เนื่อง



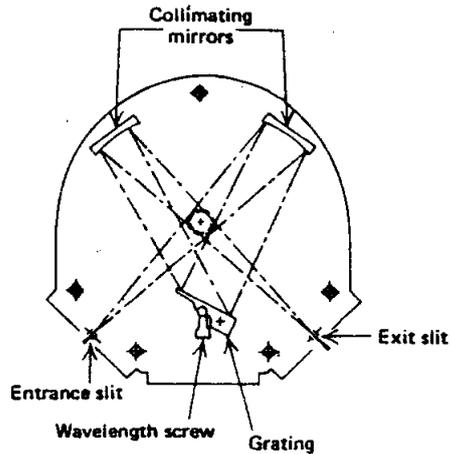
รูป 3-39 ตัวทำแสงเอกรงค์ที่มีการจัดแบบเออร์เบิต

จากลำรังสีที่เข้าสู่เกรตติงและลำรังสีที่เลี้ยวเบนจนกระทั่งโค้ง (ทรงกลม) คนละที่กัน ทางเดินของรังสีจากกระจกนี้จึงไม่มีการกระเจิง การปรับความยาวคลื่นของรังสีตามต้องการทำได้โดยหมุนเกรตติงรอบแกนตัวทำแสงเอกรงค์ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ

การจัดแบบเซอร์นิตอร์เนอร์ (Czerny Turner Mounting) รูป 3-40 มีการจัดคล้ายเออร์เบิตแต่ใช้กระจกเงาโค้งแผ่นเล็กสองแผ่น ช่องเล็กยาวเข้าและออกมีขนาดเล็ก การจัดตัวทำแสงเอกรงค์แบบนี้จึงทำยาก แต่ตัวทำแสงเอกรงค์แบบนี้มีการกระจายรังสีดี ไม่มีแสงอื่นลอดเข้ามา อุปกรณ์ที่ใช้ตัวทำแสงเอกรงค์แบบนี้จึงมีราคาแพง ตัวทำแสงเอกรงค์ที่มีการจัดแบบครอสเซอร์นิตอร์เนอร์ แสดงในรูป 3-41

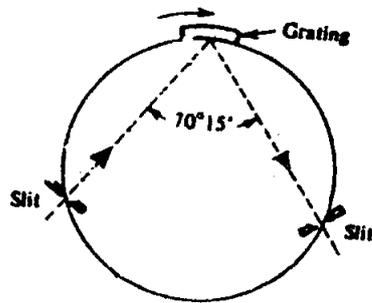


รูป 3-40 ตัวทำแสงเอกรงค์แบบเซอร์นิตอร์เนอร์ (CN เป็นเส้นปกติของเกรตติง มุม ϕ มีค่าคงที่ เมื่อต้องการเปลี่ยนความยาวคลื่น ให้หมุนเกรตติงรอบจุด C การเพิ่มมุม i ทำให้จาก $i = \phi$ ถึง $i = 2\phi$)



รูป 3-41 ครอสเซอร์ไนเทอร์เนอร์

การจัดตัวทำแสงเอกรงค์สำหรับรังสีช่วงไกลอัลตราไวโอเล็ต (Mounting for the far ultraviolet) ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้งานช่วงสุญญากาศถึงไกลอัลตราไวโอเล็ต 180 ถึง 50 นาโนเมตร นิยมใช้เกรตติงเลี้ยวเบน แม้ว่าปริซึมลิเทียมฟลูออไรด์ใช้ได้ถึง 120 นาโนเมตร สเปกตรัมช่วงนี้มีปัญหาจากการสะท้อนและอากาศดูดกลืนรังสี การใช้แมกนีเซียมฟลูออไรด์เคลือบบนอะลูมิเนียม การสะท้อนที่ความยาวคลื่น 120 นาโนเมตร มีค่าร้อยละ 70 ส่วนการสะท้อนที่ 50 นาโนเมตร มีค่าประมาณร้อยละ 15 ดังนั้น ถ้าภาพในตัวทำแสงเอกรงค์มีการสะท้อนรังสีสามครั้ง (กระจกเงา 2 บาน เกรตติง 1 อัน) ความเข้มที่ออกมาเหลือเพียงร้อยละ 1 ถึง 30 ภายในตัวทำแสงเอกรงค์ควรเป็นสุญญากาศ ตัวทำแสงเอกรงค์ที่ใช้ช่วงความยาวคลื่นนี้ ได้แก่ เซยานามิโอกา (seya Namioka) ดังรูป 3-42 ช่องเล็กยาวเข้าและออกอยู่บนวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับปริซึมเกรตติง ช่องเล็กยาวเข้าและออกทำมุม 70 องศา 15 ลิปดา การปรับความยาวคลื่นทำโดยหมุนเกรตติงรอบแกนในแนวตั้ง เทอมต่าง ๆ ที่ใช้กับตัวทำแสงเอกรงค์แสดงในตาราง 3-2



รูป 3-42 การจัดแบบเซยานามิโอกา

ตาราง 3-2 คำจำกัดความต่าง ๆ ที่ใช้กับตัวทำแสงเอกรงค์

เทอม	คำจำกัดความ	สัญลักษณ์ และหน่วย
การแยก หรือกำลังการแยก	ความสามารถในการแยกความถี่ที่อยู่ใกล้กัน จัด ในเทอมของความถี่ที่ใกล้กัน $\Delta\nu$ ในสเปกตรัม ที่สามารถแยกจากกันได้	$R = \bar{\nu}/\Delta\nu$ ไม่มีหน่วย
การกระจาย การกระจายเชิงมุม	การกระจายความยาวคลื่นในอวกาศ ช่วงมุม $d\theta$ ที่แถบความยาวคลื่น $d\lambda$ ถูกกระจาย	$d\theta/d\lambda$ เรเดียนต่อ นาโนเมตร
การกระจายเชิงเส้น	ระยะ dx ที่แถบความยาวคลื่น $d\lambda$ กระจายในระนาบโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์	$dx/d\lambda$ มิลลิเมตรต่อ นาโนเมตร
ส่วนกลับการกระจายเชิงเส้น	ช่วงความยาวคลื่นที่มีการกระจาย ในระยะทางหนึ่งหน่วยใน ระนาบโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์	$d\lambda/dx$ นาโนเมตรต่อ มิลลิเมตร
ความกว้างช่องเล็กลงของ สเปกตรา (Spectral slit width) หรือแถบความกว้าง (band width) หรือแถบผ่าน (band pass)	ช่วงความยาวคลื่นที่วัดที่ครึ่งของความเข้มรังสี	

ช่วงสเปกตราที่ไม่มีการรบกวน (free spectral range F) ของเกรตติง บอกถึงแถบความยาวคลื่นในช่วงอันดับที่กำหนดให้ โดยไม่มีการรบกวนของรังสีจากอันดับอื่น ช่วงนี้จะไม่มีการซ้อนทับกันของความยาวคลื่นที่สนใจกับความยาวคลื่นอันดับอื่น ความกว้างของแถบความยาวคลื่นนี้ คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ถ้าให้ช่วงสเปกตราที่ไม่มีการรบกวนในอันดับที่ n ที่ความยาวคลื่นจาก λ_1 ถึง λ_2 โดย $\lambda_2 > \lambda_1$ ความยาวคลื่นสั้น λ_1 อาจเป็นความยาวคลื่นที่เกิดจากรังสีอันดับ $n + 1$ ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนที่มุมเดิม เช่นเดียวกับ λ_2 จากสมการ 3.5 ได้ $(n + 1)\lambda_1 = n(\lambda_1 + \Delta\lambda)$ โดย $\lambda_2 - \lambda_1 = \Delta\lambda$ ดังนั้น $F = \Delta\lambda = \lambda_1/n$

ตัวอย่าง รังสีที่มีความยาวคลื่น 800 ถึง 200 นาโนเมตร ตกสู่เกรตติงแบบสะท้อนแสง จงหาช่วงสเปกตรารับอันดับหนึ่งและสองที่ไม่มี การรบกวน

ปกติความยาวคลื่นสั้นจะเกิดจากรังสีที่มีอันดับเพิ่มขึ้น เมื่อปรับมุมเกรตติงให้รังสี 800 นาโนเมตรถูกเลี้ยวเบนที่อันดับหนึ่ง รังสี 400 นาโนเมตรเป็นรังสีอันดับสอง รังสี 267 นาโนเมตรเป็นรังสีอันดับสาม และรังสีอันดับอื่น ๆ ช่วงสเปกตร้าอันดับหนึ่งที่ไม่มีการรบกวนจะอยู่ในช่วง 800 ถึง 400 นาโนเมตร ช่วงสเปกตร้าอันดับสองที่ไม่มีการรบกวนจะอยู่ในช่วง 400 ถึง 267 นาโนเมตร ช่วงสเปกตร้าอันดับสามที่ไม่มีการรบกวนจะอยู่ในช่วง 267 ถึง 200 นาโนเมตร จากสมการ $F = \Delta\lambda$ หรือ λ_1/n หาช่วงความยาวคลื่นอันดับหนึ่งที่ไม่มีการรบกวนได้ มีค่า

$$\begin{aligned} F &= \Delta\lambda &= \lambda_1/n \\ &= 800 - 400 &= 400/1 \\ &= 400 &= 400 \text{ นาโนเมตร} \end{aligned}$$

ช่วงความยาวคลื่นอันดับสองที่ไม่มีการรบกวน มีค่า

$$\begin{aligned} F &= \Delta\lambda &= \lambda_1/n \\ &= 400 - 267 &= 267/2 \\ &= 133 &= 133 \text{ นาโนเมตร} \end{aligned}$$

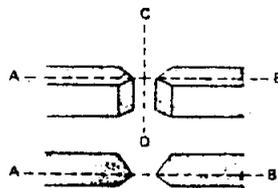
ช่วงความยาวคลื่นอันดับสามที่ไม่มีการรบกวน มีค่า

$$\begin{aligned} F &= 267 - 200 &= 200/3 \\ &= 67 &= 67 \text{ นาโนเมตร} \end{aligned}$$

ช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้จะปรากฏในแต่ละอันดับ

ความกว้างช่องเล็กยาวของตัวทำแสงเอกรงค์ (Monochromator Slits)

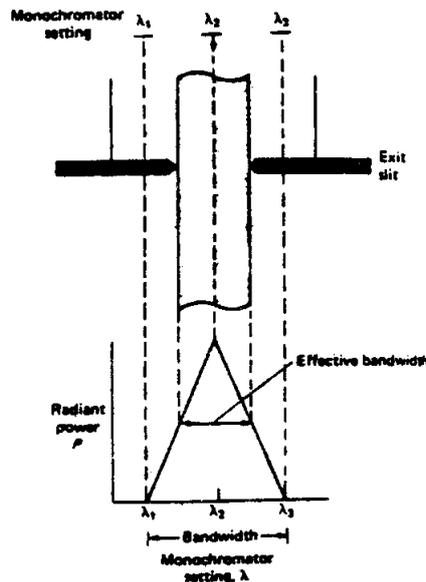
ความกว้างช่องเล็กยาวเป็นส่วนสำคัญในการวิเคราะห์คุณภาพ ช่องเล็กยาวเป็นโลหะสองแผ่นที่มีปลายแหลมคม ดังรูป 3-43 ขอบช่องเล็กยาวเข้า (entrance slit) ตรงและขนานกับขอบช่องเล็กยาวออก (exit slit) ตัวทำแสงเอกรงค์ทั่วไป ช่องเล็กยาวเข้าและออกมักปรับไม่ได้ ยกเว้นตัวทำแสงเอกรงค์บางชนิดปรับช่องเล็กยาวเข้าออกได้



รูป 3-43 ลักษณะช่องเล็กยาว

ช่องเล็กลายเข้าทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ภาพของรังสีจะถูกโฟกัสที่ผิวช่องเล็กลายออก ถ้าแหล่งกำเนิดรังสีมีสองสามความยาวคลื่น ภาพที่เหลี่ยมผืนผ้าที่ปรากฏที่ผิวช่องเล็กลายออกจะปรากฏเป็นเส้นสว่างตามจำนวนความยาวคลื่น เส้นต่าง ๆ นี้จะถูกโฟกัสบนช่องเล็กลายออกโดยการหมุนวัสดุที่ใช้กระจายรังสี (ปริซึมหรือเกรตติง) ถ้าช่องเล็กลายเข้าและออกมีขนาดเท่ากัน ภาพของช่องเล็กลายเข้าจะปรากฏเต็มช่องเล็กลายออกเมื่อปรับตัวทำแสงเอกรงค์ให้พอดีกับความยาวคลื่นที่เข้า การหมุนตัวทำแสงเอกรงค์ไปทางใดทางหนึ่งทำให้ปริมาณรังสีหรือความเข้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ภาพที่ปรากฏบนช่องเล็กลายออกจะมีค้ำหมุนตัวทำแสงเอกรงค์ไปไม่ให้รังสีที่เข้ามาผ่านไปได้เลย

ผลของความกว้างช่องเล็กลายที่มีต่อการแยก (Effect of Slit Width on Resolution) รูป 3-44 แสดงภาพของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว λ_2 บนช่องเล็กลายออกโดยช่องเล็กลายเข้าและออกมีความยาวเท่ากัน ภาพของช่องเล็กลายเข้าจะออกมาเต็มตรงช่องเล็กลายออก เมื่อหมุนตัวทำแสงเอกรงค์ไปทาง λ_1 หรือ λ_3 ภาพ λ_2 ตรงช่องเล็กลายออกจะมีค้ำน้อยลง เพราะภาพ λ_2 จะออกนอกช่องเล็กลาย ส่วนล่างของรูปแสดงการพล็อตกำลังหรือความเข้มที่ออกมากับการปรับตัวทำแสงเอกรงค์ แถบความกว้าง (band width) เป็นช่วงการปรับตัวทำแสงเอกรงค์ (หน่วยความยาวคลื่น) เพื่อให้ภาพจากช่องเล็กลายเข้าตรงช่องเล็กลายออก ถ้าใช้รังสีที่มีหลายความยาวคลื่น แถบนี้แทนช่วงความยาวคลื่นของรังสีที่ออกจากช่องเล็กลายออกตามการ



รูป 3-44 ความเข้มของรังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว λ_2 ตรงช่องเล็กลายออก เมื่อปรับตัวทำแสงเอกรงค์ให้รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียวช่วงใกล้ λ_2 ผ่าน โดยช่องเล็กลายเข้าและออกมีขนาดเท่ากัน

แถบความกว้างยังผล (Effective Band width) คือแถบความกว้างที่ครึ่งความสูงเมื่อความกว้างช่องเล็กยาวเข้าและออกมีค่าเท่ากันดังรูป 3-41 แถบความกว้างยังผลสัมพันธ์กับส่วนกลับการกระจายเชิงเส้นดังสมการ

$$D^{-1} = \frac{d\lambda}{dx}$$

$d\lambda$ และ dx ช่วงความยาวคลื่นบนระยะเชิงเส้นตามระนาบโฟกัส รูป 3-44 dx มีค่าเท่ากับ ความกว้างช่องเล็กยาว W $d\lambda$ แถบความกว้างยังผล ดังนั้น

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = WD^{-1} \quad \dots\dots(3-21)$$

รูป 3-45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแถบความกว้างยังผลของเครื่อง และความสามารถในการแยกพิค สเปกตราร่องเล็กยาวออกของตัวทำแสงเอกรงค์รับรังสีที่มีความยาวคลื่น λ_1 , λ_2 และ λ_3 แต่ละลำรังสีมีความเข้มเท่ากัน รูปบนแถบความกว้างยังผลของเครื่องมีค่าเท่ากับผลต่างของความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 หรือ λ_2 และ λ_3 เมื่อปรับตัวทำแสงเอกรงค์ที่ λ_2 รังสีที่ λ_2 จะปรากฏเต็มช่องเล็กยาวออก การปรับโดยการหมุนตัวทำแสงเอกรงค์ไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง มีผลทำให้ความเข้มรังสี λ_2 มีค่าน้อยลง แต่ความเข้มรังสีของความยาวคลื่นอื่น λ_1 หรือ λ_3 เพิ่มขึ้นเท่ากับปริมาณรังสีที่ลดลง จากเส้นที่ขีดกันขวาแสดงว่าไม่มีการแยกสเปกตรารายของสามความยาวคลื่น

รูปกลางแถบความกว้างยังผลมีค่าน้อยลง เมื่อลดความกว้างช่องเล็กยาวออกและเข้าไปเศษสามส่วนสี่ของของเดิม เส้นทึบที่ได้จากการพล็อตรูปทางขวาแสดงว่าเส้นทั้งสาม λ_1 , λ_2 และ λ_3 มีการแยกกันเป็นบางส่วน เมื่อแถบความกว้างยังผลลดลงครึ่งหนึ่ง เส้นทึบทางด้านขวาแสดงว่าเส้นทั้งสาม λ_1 , λ_2 และ λ_3 จะมีการแยกกันอย่างสมบูรณ์ การแยกเส้น λ_2 ออกจาก λ_1 และ λ_3 จะทำได้เมื่อปรับความกว้างช่องเล็กยาว (W) แถบความกว้างยังผลของตัวทำแสงเอกรงค์มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของผลต่างความยาวคลื่น (λ_1 และ λ_2)

ตัวอย่าง ตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติงมีส่วนกลับการกระจายเชิงเส้น 1.2 นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร เมื่อใช้ตัวทำแสงเอกรงค์นี้แยกเส้นโซเดียม 589.0 และ 589.6 นาโนเมตร จะต้องใช้ความกว้างช่องเล็กยาวทางทฤษฎีเท่าไร

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = \frac{1}{2}(589.6 - 589.0) = 0.3 \text{ นาโนเมตร}$$

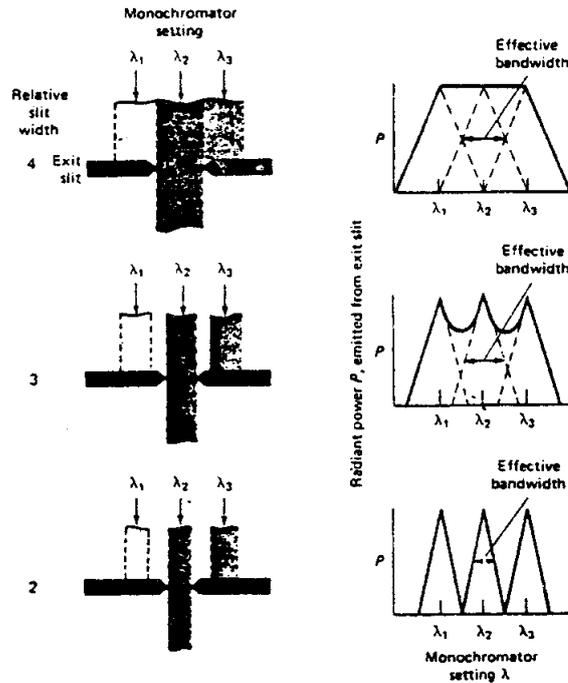
จาก

$$\Delta\lambda_{\text{eff}} = WD^{-1}$$

$$0.3 \text{ นาโนเมตร} = W \times 1.2 \text{ นาโนเมตรต่อมิลลิเมตร}$$

$$W = 0.25 \text{ มิลลิเมตร}$$

ปกติต้องใช้ความกว้างช่องเล็กยาวทางปฏิบัติ แคบกว่าค่าที่คำนวณได้เพื่อให้ได้ การแยกตามที่ต้องการ



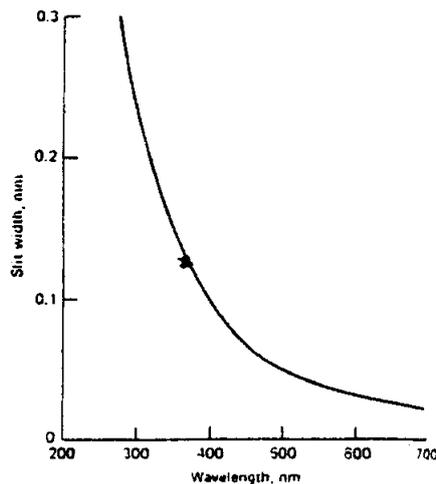
รูป 3-45 ผลความกว้างช่องเล็กยาวที่มีต่อสเปกตรารังสี λ_1 , λ_2 และ λ_3 ผ่านช่องเล็กยาวโดยช่องเล็กยาว เข้าและออกมีขนาดเท่ากัน รูปทางขวามือแทนความเข้มรังสีที่เปลี่ยนไปจากช่องเล็กยาวออก เมื่อเปลี่ยนการปรับตัวทำแสงเอกรงค์

การเลือกความกว้างช่องเล็กยาว (Choice of Slit Width) แทบความกว้างยังผลของ ตัวทำแสงเอกรงค์ขึ้นกับการกระจายของเกรตติงหรือปริซึม เช่นเดียวกับความกว้างช่องเล็ก ยาวเข้าและออก ตัวทำแสงเอกรงค์หลายชนิดปรับความกว้างช่องเล็กยาวได้เพื่อให้ได้แถบ ความกว้างยังผลตามต้องการ ปกติใช้ความกว้างช่องเล็กยาวแคบที่สุดเพื่อแยกแถบดูดกลืน หรือปล่อยช่วงแคบ ๆ ตามที่ต้องการเพื่อทำคุณภาพวิเคราะห์ แต่การลดความกว้างช่อง เล็กยาวมีผลทำให้ความเข้มแสงลดลง การทำปริมาณวิเคราะห์ไม่ถูกต้องจึงต้องใช้ความ กว้างช่องเล็กยาวมาก

การเปรียบเทียบตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติงและปริซึม A Comparison of Grating Prism Monochromators

การใช้งานตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติงสะดวกกว่าปริซึม เพราะการกระจายไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น การออกแบบตัวทำแสงเอกรงค์จึงง่ายกว่าปริซึม การกระจายของเกรตติงมีค่าคงที่จึงไม่ต้องเปลี่ยนความกว้างช่องเล็กยาวเมื่อเปลี่ยนช่วงความยาวคลื่น ส่วนการกระจายของปริซึมไม่เป็นแบบเชิงเส้น เมื่อใช้ปริซึมกระจายรังสีที่มีความยาวคลื่นมากต้องเปิดความกว้างช่องเล็กยาวแคบ ๆ เพื่อให้ได้แถบความกว้างยังผลตามต้องการ รูป 3-46 ความกว้างช่องเล็กยาวของตัวทำแสงเอกรงค์แบบลิทโทกราฟีปริซึมเป็นมิลลิเมตรที่เปลี่ยนไปเพื่อให้ได้แถบความกว้างยังผล 1 นาโนเมตร ที่ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร ต้องเปิดความกว้างช่องเล็กยาว 0.3 มิลลิเมตร ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ต้องเปิดความกว้างช่องเล็กยาว 0.03 มิลลิเมตรลดลงสิบเท่าเพื่อให้ได้แถบความกว้างยังผลคงที่ เกรตติงมีการแยกดีกว่าปริซึม เนื่องจากการกระจายของเกรตติงเป็นแบบเส้นตรงหรือเชิงเส้นกับความยาวคลื่น ตัวทำแสงเอกรงค์แบบเกรตติงจึงใช้ได้ทุกช่วงความยาวคลื่น เกรตติงแบบสะท้อนแสงใช้หลักการกระจายแสงในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วงไกลถึงไกลอินฟราเรด ข้อเสียของเกรตติงมีปริมาณรังสีที่ไม่ต้องการออกมา เช่น สเปกตรัมของรังสีที่มีอันดับมาก รังสีอันดับสูงนี้แยกเอาออกได้โดยใช้ฟิลเตอร์หรือปริซึมวางไว้หลังหรือหน้าเกรตติง

ข้อดีของเกรตติงอีกอย่างหนึ่งคือ เกรตติงมีการกระจายดีกว่าปริซึมที่มีขนาดเท่ากัน ข้อเสียของเกรตติงแบบระนาบ มีแสง (รังสี) ที่ไม่ต้องการลอดเข้าไป รังสีอันดับอื่น (สอง, สาม) ผ่านออกมา ส่วนฮอโลกราฟีเกรตติงมีปัญหาที่ว่านั้นน้อยมาก การแก้ปริมาณรังสีที่ไม่ต้องการทำได้โดยใช้ฟิลเตอร์ดูดกลืนรังสีนี้



รูป 3-46 ความกว้างช่องเล็กยาวที่ต้องการให้ได้รังสีจากตัวทำแสงเอกรงค์ลิทโทกราฟีปริซึมควออร์ตซ์ มีค่าคงที่ 1 นาโนเมตร

อุปกรณ์รุ่นใหม่นิยมใช้เกรตติงเป็นวัสดุกระจายรังสี เพราะมีคุณภาพดีกว่าแม้ว่าราคาเกรตติงจะสูงกว่าปริซึมก็ตาม

รังสีที่ลอดเข้าไปในตัวทำแสงเอกรงค์

(Stray Radiation in Monochromator)

รังสีที่ลอดเข้าไป คือรังสีที่มีความยาวคลื่นต่างจากรังสีที่ออกจากตัวทำแสงเอกรงค์ ตัวทำแสงเอกรงค์เป็นอุปกรณ์ที่กั้นไม่ให้รังสีอื่นเข้าไปได้ ดังนั้นรังสีที่ลอดเข้าไปจึงเกิดจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีการเดินทางของลำรังสีผิดปกติ (วิปริต) โดยอุปกรณ์

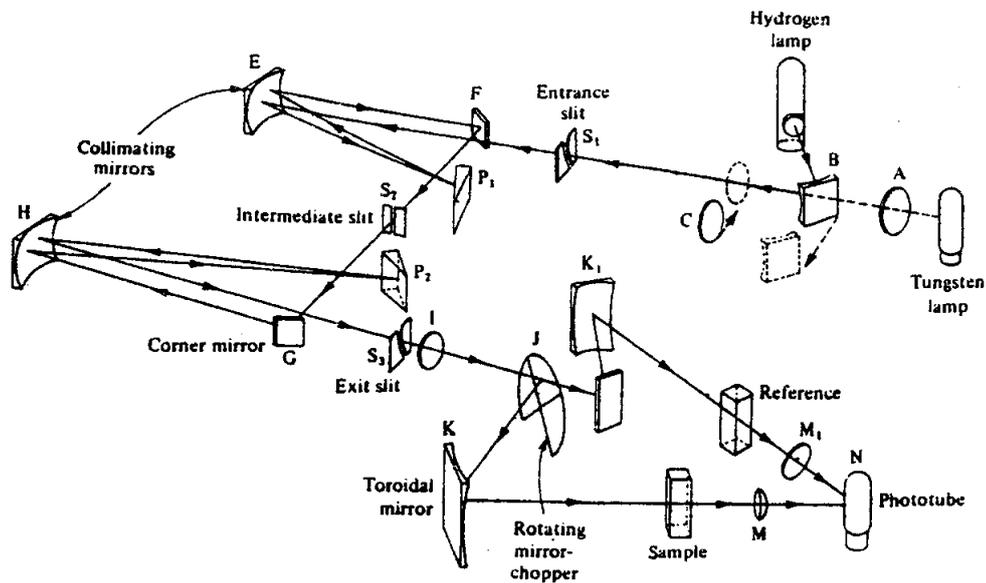
1. เกิดจากการเลี้ยวเบนจากเกรตติงตรงมุมที่ไม่ต้องการ
2. เกิดจากการเลี้ยวเบนตรงขอบ (edges) ของช่องเล็กยาว
3. เกิดจากการสะท้อนบริเวณผิวในของฟิลเตอร์ เลนส์ หรือปริซึม
4. เกิดจากการกระเจิง โดยอนุภาคในทางเดินรังสี ฝุ่น หรือรอยขีดบนอุปกรณ์ที่ใช้เลี้ยวเบนรังสี

ถ้ารังสีเหล่านั้นมาถึงช่องเล็กยาวออก รังสีที่มีความยาวคลื่นตามต้องการจะมีรังสีที่มีความยาวคลื่นอื่นออกมาได้

วิธีการลดปริมาณรังสีที่ลอดเข้าไป ทำได้โดย

1. ทาผิวด้านในตัวทำแสงเอกรงค์ด้วยสีดำด้าน
2. ใส่อุปกรณ์บังแสง (baffle) ขวางทางเดินรังสี ยกเว้นบริเวณช่องทางเดินรังสี
3. ใช้อุปกรณ์การแยกรังสีที่มีคุณภาพดี ช่องเล็กยาวต้องมีขอบที่แหลมคม
4. มีหน้าต่างอยู่หน้าช่องเล็กยาวเพื่อกันฝุ่นและควัน

ถ้าไม่ต้องการรังสีที่ไม่ต้องการลอดผ่านเครื่องตรวจหา มักใช้ตัวทำแสงเอกรงค์สองชุด ดังรูป 3-47 ตัวทำแสงเอกรงค์สมัยใหม่มีวัสดุกระจายรังสีสองอัน มีเกรตติงหรือปริซึมสองอัน หรือเกรตติงและปริซึมอย่างละอัน การจัดแบบนี้เพื่อลดปริมาณรังสีที่ไม่ต้องการออกมา อุปกรณ์นี้มีการกระจายและการแยกสเปกตราดีขึ้นมาก ถ้าใช้วัสดุกระจายรังสีอันหนึ่งเป็นเกรตติง ความยาวคลื่นของรังสีอันดับมากกว่าหนึ่งจะถูกกำจัดโดยวัสดุที่ใช้กระจายรังสีอันที่สอง



รูป 8-47 อุปกรณ์ตัวทำแสงเอกรงค์สองชั้นที่ช่วยลดปริมาณรังสีที่ไม่ต้องการ

วัสดุที่ใช้ในทางเดินแสง (Optical Material)

สารต่างชนิดกันยอมให้รังสีที่มีช่วงความยาวคลื่นต่างกัน ผ่านออกมาได้ไม่เท่ากัน วัสดุที่ใช้ทำเซลล์ เลนส์ ปริซึม และหน้าต่างที่ใช้ในเครื่องสเปกโทร จึงเป็นตัวจำกัดชนิดของเครื่องสเปกโทร วัสดุที่นิยมได้แก่ควอartzหรือฟิวส์ซิลิกาในช่วงอัลตราไวโอเลต ต่ำกว่า 350 นาโนเมตร เซลล์แก้วและเซลล์พลาสติกใช้ในช่วงวิสิเบิล เกลือของโลหะหมู่ IA และ II A ยอมให้รังสีอินฟราเรดช่วงกลางและช่วงไกลผ่าน แต่สารเหล่านี้ยอมและถูกทำลายโดยความชื้นหรือแอลกอฮอล์ที่มีน้ำปน เจอร์มาเนียมและซิลิคอนยอมให้รังสีอินฟราเรดช่วงความยาวคลื่น 10,000 ถึง 630 ต่อเซนติเมตรผ่าน และมีความแข็งดี สารทั้งสองมีค่าดรรชนีหักเหมากจึงนิยมใช้ทำเลนส์ แต่สารทั้งสองสะท้อนแสงมาก (ประมาณร้อยละ 50) จึงต้องเคลือบสารลดการสะท้อนแสง เช่น สารหนูไตรซัลไฟด์ เออร์ทาน-6 (Irtan) พอลิเอทิลีน และควอartz

ที่ใส่สารตัวอย่าง (Sample Container)

เซลล์ที่ดีต้องมีผนังเซลล์ตั้งฉากกับลำรังสี เพื่อลดปริมาณรังสีที่จะเกิดการสะท้อน เซลล์ที่ใช้ในการศึกษาช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล มีทางเดินรังสี 1 เซนติเมตร 0.1 และ 10 เซนติเมตร เซลล์ที่ใช้ในการศึกษาสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวในช่วงอินฟราเรด

มีทางเดินรังสีน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร เซลล์ที่ใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รอยนิ้วมือ ไขมัน หรือสิ่งสกปรกอื่น ๆ ที่ติดบนผิวเซลล์ มีผลทำให้ความส่องผ่านเปลี่ยน ดังนั้น ก่อนวัดสารละลาย ต้องทำความสะอาดผิวเซลล์ ห้ามจับเซลล์บริเวณที่แสงผ่าน ห้ามอบเซลล์ ทำการตรวจสอบเซลล์เป็นบางครั้งกับสารละลายที่มีค่ารังสีแอมบอร์แบนซ์แน่นอน

การเทียบมาตรฐานความยาวคลื่น (Wavelength Calibration)

เส้นดูดกลืนหรือปล่อยของอะตอมกับพีคดูดกลืนหรือปล่อยของโมเลกุลของสารที่มีสมบัติเฉพาะ ใช้ในการเทียบมาตรฐานสเกลอ่านความยาวคลื่นของตัวทำแสงเอกรงค์ การเทียบมาตรฐานทำได้โดยการปรับความยาวคลื่นโดยใช้มือเพื่อวัดความส่องผ่านหรือแอมบอร์แบนซ์จากตัวเลขหรือเข็มวัดบนหน้าปัด หรือวัดค่าความส่องผ่าน หรือแอมบอร์แบนซ์จากข้อมูลบนกระดาษโดยเปลี่ยนความยาวคลื่นไปโดยอัตโนมัติ

หลอดไอปรอทที่มีความดันต่ำ ใช้ในการเทียบมาตรฐานเส้นความยาวคลื่นช่วงวิสิเบิลและอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากการแทรกซิ่นของอะตอมปรอทสถานะที่เป็นแก๊ส เส้นความยาวคลื่นที่ได้จากหลอดปรอทมีความเข้มสูงและแยกจากกันดีมาก หลอดฮอลโลแคโทดที่เกิดจากการดิสชาร์จของแก๊สก็ใช้เป็นเส้นอ้างอิงได้ เช่น แคดเมียม สังกะสี ฮีเลียม นีออน และรูบิเดียม ใช้ในการเทียบมาตรฐานความยาวคลื่นมาตรฐานในช่วง 194 ถึง 233 นาโนเมตร ส่วนช่วงความยาวคลื่น 233 ถึง 900 นาโนเมตร ใช้พีคดูดกลืนของแก้ว แรร์เอิร์ท ไตตีเมียม ไฮลเดียมออกไซด์ฟิลาเตอร์ เช่น แก้ว คอร์นิง CS 3-138 ใช้ในการเทียบมาตรฐานความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต แผ่นฟิล์มพอลิสไตรีนใช้เทียบมาตรฐานความยาวคลื่นอินฟราเรดมาตรฐานช่วงใกล้และช่วงกลาง

เครื่องตรวจหารังสี (Radiation Detector)

อุปกรณ์สมัยโบราณใช้นัยน์ตาหรือฟิล์มวัดปริมาณรังสีที่เหลือจากการดูดกลืนหรือเปล่งออก เครื่องตรวจหาต้องมีอุปกรณ์แทรกซ์ตัวเซอร์เพื่อเปลี่ยนพลังงานรังสีเป็นสัญญาณไฟฟ้า

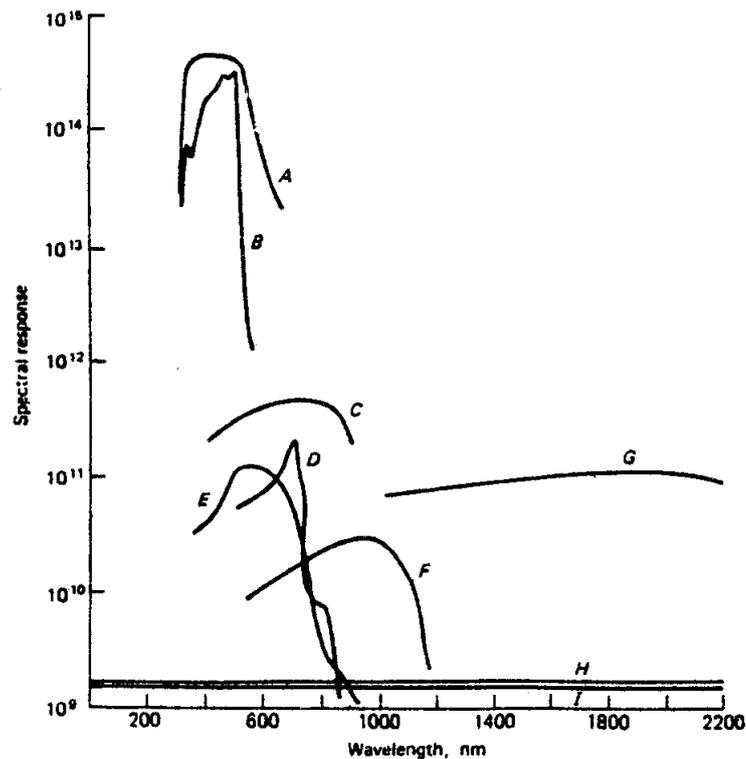
คุณสมบัติของเครื่องตรวจหาโฟโตอิเล็กทริก (Properties of Photoelectric Detector)
เครื่องตรวจหารังสีที่ดี ต้องตอบสนองพลังงานรังสีช่วงความยาวคลื่นกว้าง ไวต่อรังสีที่มีปริมาณน้อยและตอบสนองปริมาณรังสีอย่างรวดเร็ว เครื่องตรวจหานี้จะเปลี่ยนรังสีเป็นสัญญาณไฟฟ้าพร้อมที่จะขยายต่อไปและสัญญาณที่ได้มีความเสถียร สัญญาณที่เครื่องตรวจหาวัดได้แปรโดยตรงกับกำลังแสง (beam power) P

$$G = KP + K' \quad \dots\dots(3.22)$$

G สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องตรวจหา มีหน่วยเป็นกระแส ความต้านทานหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า ค่าคงที่ K วัสดุภาพไวของเครื่องตรวจหาในเทอมของการตอบสนองไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังแสง เครื่องตรวจหามักมีการตอบสนองเล็กน้อยเมื่อไม่มีรังสีผ่านสู่เครื่องตรวจหา เรียกตาร์คเคอเรนต์ หรือกระแสมืด K' อุปกรณ์ที่มีเครื่องตรวจหาตอบสนองต่อตาร์คเคอเรนต์มักมีวงจรมีป้อนกลับ (feedback circuit) เพื่อลดสัญญาณจาก K' ให้เป็นศูนย์ สมการ 3.16 จึงเขียนใหม่ได้

$$G = K'P$$

ชนิดของทรานซ์ดิวเซอร์รังสี (Types of Radiation Transducer) จากรูป 3-48 ทรานซ์ดิวเซอร์รังสีมีสองแบบ แบบแรกตอบสนองต่อโฟตอนอีกแบบตอบสนองต่อความร้อน เครื่องตรวจหาโฟตอนหรือโฟตอนอิเล็กทรอนิกส์ต้องมีผิวที่กัมมันต์และทำหน้าที่ดูดกลืนรังสี เครื่องตรวจหา



รูป 3-48 สเปกตรัมที่ได้จากทรานซ์ดิวเซอร์ชนิดต่าง ๆ A-G ทรานซ์ดิวเซอร์โฟโตอิเล็กทรอนิกส์ H-I ทรานซ์ดิวเซอร์ความร้อน A หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ B เซลล์สภาพนำไฟโต CdS C โฟโตไวลตาอิก GaAs D เซลล์สภาพนำไฟโต CdSe E เซลล์โฟโตไวลตาอิก Se/SeO F โฟโตแคโทดชนิดคอน G เซลล์สภาพนำไฟโต PbS H เทอร์มอคัปเปิล I เซลล์โกลิเย่

แบบที่ตอบสนองต่อพลังงานที่ถูกดูดกลืนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวและวัดในรูปโฟโตเคอ-
เรนต์ เครื่องตรวจหาแบบที่ตอบสนองต่อรังสีที่ชนทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนเป็นแถบนำ สัญญาณ
ที่วัดได้ขึ้นกับสภาพนำที่เพิ่มขึ้น เฉพาะรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิล อินฟราเรดช่วงใกล้และไกล
เท่านั้นที่เกิดกระบวนการเหล่านี้ เครื่องตรวจหาโฟโตอิเล็กทริกต่างจากเครื่องตรวจหาความร้อน
เพราะสัญญาณที่วัดได้ขึ้นกับปรากฏการณ์ต่าง ๆ (การดูดกลืนหนึ่งโฟตอน) แทรนซ์ดิวเซอร์
ความร้อนใช้ตรวจหารังสีอินฟราเรดเนื่องจากเป็นเครื่องรับรู้แบบไม่ต้องทำให้เป็นควอนตัม

เครื่องตรวจหาโฟตอนมักมีการรบกวนแบบช็อค เครื่องตรวจหาแบบความร้อนมักมี
การรบกวนแบบจอห์นสัน รูป 3-48 สเปกตราในช่วงอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิล และอินฟราเรด
ของเครื่องตรวจหาชนิดต่าง ๆ

เครื่องตรวจหาโฟตอน Photon Detector

เครื่องตรวจหาโฟตอนมีหลายแบบ 1 เซลล์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic cell) เซลล์นี้
จะเกิดกระแสระหว่างชั้นโลหะและสารกึ่งตัวนำ 2 หลอดโฟโต (Phototube) เมื่อรังสีชน
หลอดจะมีอิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวของแข็งที่ไวต่อรังสี 3 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์
(Photomultiplier) หลอดนี้คล้ายกับหลอดโฟโต แต่มีไดโนด (แผ่นที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกมา
เป็นจำนวนเท่าของอิเล็กตรอนที่วิ่งชน) อีกหลายอัน 4 เครื่องตรวจหาสภาพนำแสง (โฟโต)
(photoconductivity) เมื่อรังสีชนสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะให้อิเล็กตรอนและโฮล ทำให้
สภาพนำเพิ่มขึ้น 5 ซิลิคอนโฟโตไดโอด (Silicon photodiode) สภาพนำของโฟตอนเพิ่มขึ้น
เมื่อไบแอสรอยต่อ pn ของสารกึ่งตัวนำแบบผกผัน ตาราง 3-3 เป็นคุณสมบัติของเครื่อง
ตรวจหาบางชนิด

โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) หรือเซลล์แบริเออร์เลเยอร์ (Barrier Layer Cell) เป็น
เซลล์ที่วัดรังสีช่วงวิสิเบิล เซลล์นี้วัดรังสีไวสูงสุดที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร การ
ตอบสนองรังสีลดลงร้อยละ 10 ที่ความยาวคลื่น 350 และ 750 นาโนเมตร

เซลล์นี้ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเป็นแบบแผ่นทองแดงหรือเหล็ก ที่มีชั้นของสารกึ่ง
ตัวนำเคลือบอยู่ เช่น ซิลิเนียมหรือทองแดง I ออกไซด์ ดังรูป 3-49 ผิวด้านนอกของสารกึ่ง
ตัวนำถูกเคลือบบาง ๆ ด้วยฟิล์มโลหะโปร่งใส เช่น ทองแดง เงินหรือตะกั่ว ฟิล์มโลหะ
โปร่งใสเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่รับอิเล็กตรอนหรือขั้วไฟฟ้าวรรวม (collector
electrode) ทองแดงหรือเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าที่สอง อุปกรณ์นี้จัดอยู่ภายในช่องโปร่งใส เมื่อ

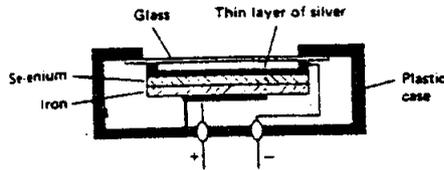
คุณสมบัติของเครื่องตรวจหารังสีบางชนิดดูได้จากตาราง 3-3

ชนิด	ธาตุทำ	ขีดจำกัดการตรวจหา และเวลาในการตอบสนอง	ช่วงความถี่ ที่ดีที่สุด ไมโครเมตร	สัญญาณที่วัดได้ ชนิดอิมพีแดนซ์ (ความต้านทานเชิง ซ้อน) ชนิดการรบกวน
ก. เครื่องตรวจหา หลอดโฟโตมัลติ พลายเออร์	หมู่ 1 และ 5 โลหะออกไซด์ เคลือบบนแคโทด	5×10^{14} (100 เฮิรตซ์) < 1 ไมโครวินาที	0.16-0.7	กระแส, สูง, ร็อดนอยส์ (Shot noise)
หลอดโฟโต	โลหะแอลคาไลด์- ออกไซด์	< 1 ไมโครวินาที	0.2-1	กระแส, สูง, ร็อดนอยส์
เซลล์โฟโตไวลตา อีก	สารกึ่งตัวนำ	< 1 ไมโครวินาที	0.4-0.8	กระแสหรือแรงเคลื่อน ไฟฟ้า, ต่ำ, ร็อดนอยส์
โฟโตกราฟิก	บนโลหะ	< 1 ไมโครวินาที	0.2-1.2	
ฟิล์มหรือเพลต	เมลิต $Ag \times$ ใน อิมัลชัน	แปรได้		
เซลล์โฟโตคอน- ดักทีฟ	I PbS, PbSe InSb II Ge, Cu, Au หรือ Zn ที่ถูก กระตุ้น ทำงานที่ 5 องศาเซลวิน	5×10^8 (90 เฮิรตซ์) 2-1,000 ไมโครวินาที 10^{10} (900 เฮิรตซ์) 0.1-1 ไมโครวินาที	0.7-45 2-15 ถึง 2-100	เปลี่ยนความต้านทาน, สูง, เทอร์มัลนอยส์ เปลี่ยนความต้านทาน, สูง, เทอร์มัลนอยส์

คุณสมบัติของเครื่องตรวจหารังสีบางชนิดที่ได้จากตาราง 3-3

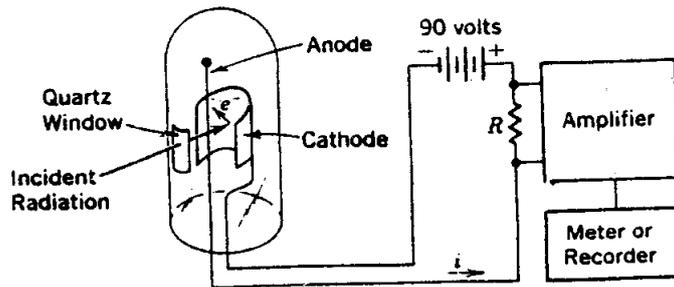
ชนิด	ธาตุที่ไว	ขีดจำกัดการตรวจหา และเวลาในการตอบสนอง	ช่วงความถี่ ที่ดีที่สุด ไมโครเมตร	สัญญาณที่วัดได้ ชนิดอิมพัลส์ (ความต้านทานเชิง ซ้อน) ชนิดการรบกวน
ชนิด ข. เครื่องตรวจหาความรบกวน เทอร์มอคับเบิล (เทอร์มอไพล์)	รอยต่อของโลหะ ต่างชนิดกัน และ แผ่นดำทำหน้าที่ ดูดกลืนรังสี	2×10^3 (5 เฮิรตซ์) 5 ถึง 100 มิลลิวินาที	0.8-40	แรงเคลื่อนไฟฟ้า, ต่ำ, เทอร์มอลน้อย
โบโลมิเตอร์ (เครื่องวัดแบบ สะพาน)	ขดลวดความ ต้านทานหรือ แผ่นเทอร์มิสเตอร์ กับแผ่นดำ	2×10^3 (10 เฮิรตซ์) 10 มิลลิวินาที ถึง 5 ไมโครวินาที	0.8-40	เปลี่ยนความต้านทาน, ต่ำ ถึงสูง, เทอร์มอลกับ ฟลิกเกอร์น้อย
นิวมาติก (เซลล์โคเลย์) ไพโรอิเล็กทริก	ห้องเก็บแก๊สที่ มีชั้นบาง ๆ สีดำ ผลึกไพโรอิเล็กทริก ที่ที่มีอิเล็กทริก โพลาไรเซชัน ถาวร	$2-10^3$ (เฮิรตซ์) 3 ถึง 30 มิลลิวินาที 3×10^3 20 ไมโครวินาที	0.8-1,000 0.8-1,000	กระแส, เทอร์ มอลน้อย แรงเคลื่อนไฟฟ้า, เทอร์มอลน้อย

รังสีที่มีพลังงานสูงพอชนสารกึ่งตัวนำ พ้นระโคเวเลนตจะแตกทำให้เกิดการนำอิเล็กตรอนหรือโฮล (holes) อิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนไปยังฟิล์มโลหะ ส่วนโฮลเข้าสู่ฐานที่มีสารกึ่งตัวนำเกาะอยู่ อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาอย่างอิสระผ่านวงจรภายนอกเพื่อทำปฏิกิริยากับโฮลเหล่านี้ ขนาดของกระแสที่เกิดขึ้นแปรโดยตรงกับจำนวนโฟตอนที่ชนผิวของสารกึ่งตัวนำ และมีค่ามากพอที่จะวัดได้ด้วยแกลวโนมิเตอร์หรือไมโครแอมมิเตอร์ ถ้าวงจรภายในมีความต้านทานน้อย (น้อยกว่า 400 โอห์ม) กระแส (โฟโตเคอเรนต) ที่วัดได้แปรโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ชนเซลล์ในช่วง 10 ถึง 100 ไมโครแอมแปร์



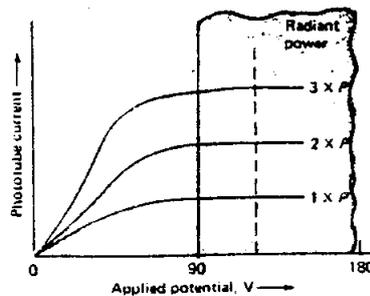
รูป 3-49 เซลล์แบริเออร์เลเยอร์

เซลล์แบริเออร์เลเยอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทนทานต่อการวัดรังสี เซลล์นี้ไม่ต้องใช้แหล่งให้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก การตอบสนองของรังสีที่มีปริมาณน้อยไม่ดี เซลล์นี้มีความต้านทานภายในน้อย การใช้เครื่องขยายสัญญาณที่วัดได้จึงให้ผลไม่ถูกต้อง เซลล์นี้ใช้วัดรังสีที่มีพลังงานมาก เมื่อใช้เซลล์นี้ไปนาน ๆ เซลล์จะเสื่อมสภาพทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ถูกต้อง (วัดได้น้อยลง)

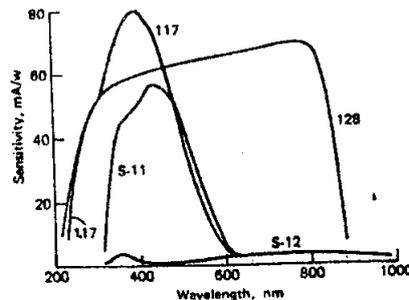


รูป 3-50 หลอดโฟโตพร้อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์

หลอดโฟโตสูญญากาศ (Vacuum Phototube) เป็นหลอดที่ภายในเป็นสูญญากาศ และมีขั้วแคโทดเป็นรูปทรงกระบอก ขั้วแอโนดเป็นเส้น หน้าต่างหลอดโปร่งใส เมื่อรังสีชนผิวแคโทดรูปโค้งซึ่งเคลือบสารที่ให้อิเล็กตรอนได้ดีเมื่อถูกรังสี ดังรูป 3-50 หลอดชนิดนี้ต้องใช้ศักย์จากภายนอกคร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสอง อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะไหลไปยังแอโนดเกิดโฟโตเคอเรนต์ (Photocurrent) จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากผิวที่ไวต่อรังสีจะมีค่าเพียงเศษหนึ่งส่วนสิบของจำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดจากเซลล์แบริเออร์เลเยอร์เมื่อเซลล์นี้มีความต้านทานภายในสูง จำนวนอิเล็กตรอนที่หลุดจากผิวที่ไวต่อรังสีแปรโดยตรงกับลำรังสีที่ชนผิว เมื่อเพิ่มศักย์คร่อมขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งมาแอโนดจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งศักย์อ้อมตัวจำนวนอิเล็กตรอนที่วิ่งมาแอโนดจะมีค่าเท่าเดิม และไม่ขึ้นกับศักย์แต่ขึ้นกับกำลังรังสี ศักย์ที่ใช้มีค่าประมาณ 90 โวลต์ ดังรูป 3-51 ผิวของโลหะที่ไวต่อรังสี



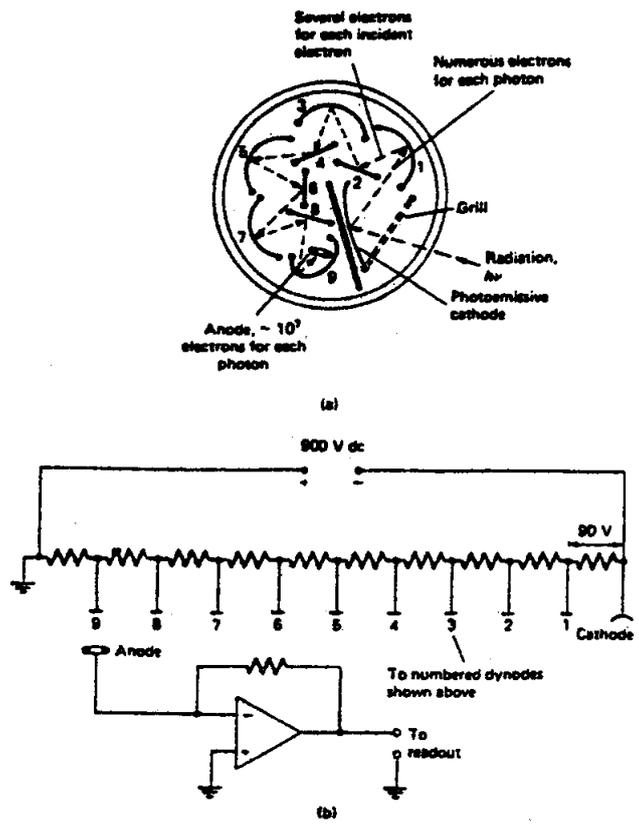
รูป 3-51 ศักย์ปริมาณต่าง ๆ ที่ให้หลอดโฟโตเมื่อมีปริมาณรังสีชนหลอดโฟโต 1P, 2P และ 3P เมื่อศักย์เกิน 90 โวลต์ หลอดโฟโตตอบสนองรังสีที่ชนคงที่



รูป 3-52 สเปกตรัมที่ได้จากหลอดโฟโตสูญญากาศที่มีผิวโลหะที่ไวต่อรังสี (กัมมันต์) มีสี่ประเภท ดังรูป 3-52 (1) พวกที่มีสภาพไวสูง (2) ไวต่อแสงสีแดง (3) ไวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (4) พวกที่ตอบสนองปานกลาง แคโทดที่มีสภาพไวสูงเป็นพวกแอโนดคาไลน์ผสมสองชนิดหมายเลข 117 เช่นพวกที่ทำจากโพแทสเซียม ซีเซียมและพลวง แคโทดที่ไวต่อแสงสีแดงเป็นพวกแอโนดคาไลน์ผสม Na/K/Cs/Sb หรือ Ag/O/Cs หมายเลข S-11 Ga/In/As ไวต่อแสงสีแดงจนถึง 1.1 ไมโครเมตร แคโทดทั้งสี่ประเภทไวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตจึงใช้วัดในช่วงนี้ได้ Ga/As ตอบสนองได้ดีปานกลางในช่วงความยาวคลื่นกว้างแทนด้วยหมายเลข 128

หลอดโฟโตมัลทิพลายเออร์ (Photomultiplier tubes) คล้ายกับหลอดโฟโต แต่มีอิเล็กโทรมอดภายในเพิ่มจากปกติอีก 9 อัน เรียกว่า ไดโนด (dynode) ดังรูป 3-53 ไดโนดหนึ่งได้รับศักย์เป็นบวกสูงกว่าแคโทด 90 โวลต์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดถูกเร่งไปชนไดโนดที่หนึ่ง เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากออกมา และวิ่งไปชนไดโนดที่สอง ซึ่งมีศักย์เป็นบวกมากกว่าไดโนดที่หนึ่ง 90 โวลต์และเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ต่อไปจนครบวงจร อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้า

หลอดโฟโตมัลทิพลายเออร์ (Photomultiplier tubes) คล้ายกับหลอดโฟโต แต่มีอิเล็กโทรมอดภายในเพิ่มจากปกติอีก 9 อัน เรียกว่า ไดโนด (dynode) ดังรูป 3-53 ไดโนดหนึ่งได้รับศักย์เป็นบวกสูงกว่าแคโทด 90 โวลต์ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากแคโทดถูกเร่งไปชนไดโนดที่หนึ่ง เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากออกมา และวิ่งไปชนไดโนดที่สอง ซึ่งมีศักย์เป็นบวกมากกว่าไดโนดที่หนึ่ง 90 โวลต์และเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ต่อไปจนครบวงจร อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้า



รูป 3-53 หลอดโฟโตมัลทิพลายเออร์
(ก) พื้นที่หน้าตัดของหลอดควัก
(ข) วงจรไฟฟ้า

คู่แอนโคมมีค่า 10^6 ถึง 10^7 เท่าของของเดิมแล้วผ่านเข้าสู่เครื่องขยายและวัดสัญญาณออกมา หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ใช้วัสดุที่มีปริมาณ (กำลัง) น้อย หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ไวต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลใช้เวลานานในการตอบสนองสั้นมาก อุปกรณ์ที่ใช้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เป็นแทรนซิวเซอร์ต้องระวังผลจากกระแสมีค ความร้อนเป็นตัวการให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะที่ไวต่อรังสี การลดปริมาณกระแสมีคทำได้โดยการระบายความร้อนจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ถ้าทำให้แทรนซิวเซอร์เย็น - 30 องศาเซลเซียสจะไม่มีผลกระทบ (ความร้อน)

แทรนซิวเซอร์ซิลิคอนไดโอด Silicon Diode Transducers

แทรนซิวเซอร์ซิลิคอนไดโอดใช้หลักการไบแอสแบบผกผันบริเวณรอยต่อ pn ของเซมิคอนดักเตอร์ที่อยู่บนแผ่นซิลิคอน รูป 3-54 การไบแอสแบบผกผันทำให้การนำไฟฟ้าบริเวณรอยต่อเกือบเป็นศูนย์ เมื่อลำรังสีชนแผ่นนี้ จะเกิดโฮลและอิเล็กตรอนจากการชน การชนทำให้เกิดกระแส กระแสนี้แปรโดยตรงกับความเข้มลำรังสีที่ชน

ซิลิคอนไดโอดไวกว่าหลอดโฟโตสุญญากาศ แต่ไวน้อยกว่าหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ โฟโตไดโอด (ซิลิคอนไดโอด) ไวต่อรังสีในช่วง 190 ถึง 1100 นาโนเมตร

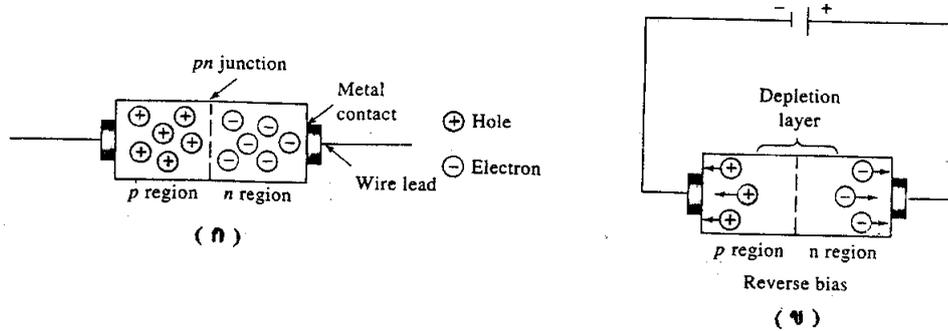
แทรนซิวเซอร์โฟตอนหลายช่อง Multichannel Photon Transducers

แทรนซิวเซอร์โฟตอนหลายช่องรุ่นแรกๆ ใช้ฟิล์มถ่ายภาพจัดวางตามความยาวระนาบโฟกัสของเครื่องสเปกโทร สัญญาณทุกสัญญาณถูกวัดพร้อมกัน แทรนซิวเซอร์ที่ใช้หลักการถ่ายภาพไวกับโฟตอนจำนวนน้อยๆ จิตจำกัดของแทรนซิวเซอร์ชนิดนี้ ต้องใช้เวลาล้างฟิล์มและวัดความเข้มบนฟิล์ม

แทรนซิวเซอร์โฟตอนหลายช่องรุ่นใหม่ใช้หลักการจัดธาตุไวแสงที่มีขนาดเล็กบนแผ่นเซมิคอนดักเตอร์ โดยจัดแบบเชิงเส้นหรือจัดแบบสองมิติ แผ่นนี้เป็นซิลิคอนและมีขนาด 2-3 มิลลิเมตร วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากธาตุไวแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแบบทีละธาตุ หรือ พร้อมกันหลายธาตุ การจัดวางระนาบโฟกัสของเครื่องสเปกโทรแบบนี้ทำให้วัดสเปกตรัมต่างๆ ได้พร้อมกัน

แทรนซิวเซอร์หลายช่องที่ใช้ในเครื่องสเปกโทรมีสามแบบ ขบวนโฟโตไดโอด (Photodiode arrays PDAs) เครื่องฉีดประจุ (Charge injection devices CIDs) เครื่องควบประจุ (Charge-coupled devices CCDs) แทรนซิวเซอร์แบบขบวนโฟโตไดโอด

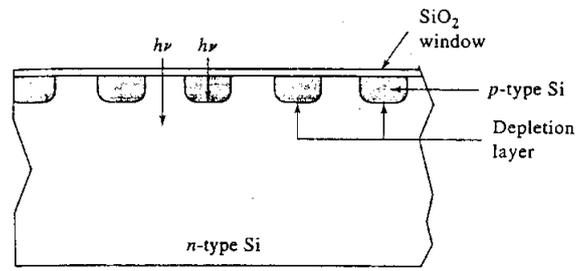
เป็นแบบหนึ่งมิติ จัดธาตุที่ไวแสงไว้ตามความยาวของแตรนซ์คิวเซอร์ แตรนซ์คิวเซอร์แบบนี้คประจุและเครื่องควบประจุ จัดธาตุไวแสงแบบสองมิติ แตรนซ์คิวเซอร์ทั้งสองแบบนี้เปลี่ยน ลำรังสีที่ชนธาตุไวแสงเป็นประจุ ประจุที่วัดจะวัดในช่วงเวลาสั้นๆ การวัดรังสีใช้หลักการให้พื้นที่ธาตุที่รับแสงเก็บแสงไว้และมีวงจรไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นประจุ และส่งผลออกเป็นภาพทางจอทีวี แตรนซ์คิวเซอร์แบบนี้อาจจัดเป็น เครื่องถ่ายโอนประจุ (charge transfer device)



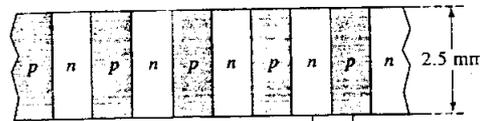
รูป 3-54 (ก) แผนภูมิของซิลิคอนไดโอด (ข) การเกิดขึ้นการพร่องเมื่อไบแอสรอยต่อเซมิคอนดักเตอร์ pn แบบผกผัน อิเล็กตรอนเคลื่อนที่มากขึ้น (ต้องใช้ความเข้มรังสีสูงขึ้น)

ขบวนโฟโตไดโอด Photodiode Arrays

นำซิลิคอนโฟโตไดโอดชิ้นเล็กๆ จำนวนมากที่มีรอยต่อ pn และถูกไบแอสแบบผกผันมาจัดรวมกันไว้เป็นแผ่นชิ้นงานยาว โดยแต่ละชิ้นจะเป็นส่วนหนึ่งของวงจรรีบ (รวม) สัญญาณ รูป 3-55 ข แสดงรูปทรงผิวของแตรนซ์คิวเซอร์ขบวนโฟโตไดโอดเพียงบางส่วน ด้านหนึ่งของซิลิคอนถูกโคฟด้วยสารที่ขาดอิเล็กตรอนจะเกิดเซมิคอนดักเตอร์ชนิด p ด้านตรงข้ามโคฟด้วยสารที่มีอิเล็กตรอนมากจะเกิดเซมิคอนดักเตอร์ชนิด n เมื่อใส่ศักย์แบบผกผันกลับจะเกิดขึ้นการพร่อง (ความต้านทานเพิ่มขึ้น) เมื่อนำชิ้นต่างๆ มาประกบกันดังรูป 3-55 ข จะได้ผิวมีขนาด (มิติ) $2.5 * 0.025$ มิลลิเมตร เมื่อแสง (รังสี) ที่ชนมีพลังงานมากกว่าพลังงานชั้นการพร่องจะเกิดการนำไฟฟ้าขึ้น โดยเกิดอิเล็กตรอนบริเวณชั้น n และเกิดโฮล (ประจุบวก) บริเวณชั้น p โดยโฮลจะเคลื่อนไปขั้วลบ อิเล็กตรอนเคลื่อนไปขั้วบวก เกิดสัญญาณกระแส จำนวนชิ้นของโฟโตไดโอดที่จัดไว้ในชิ้นงานมีช่วงจาก 64 ถึง 4096 ช่อง ส่วนใหญ่นิยมใช้ 1024 ช่องวงจรรวมสัญญาณที่อยู่ในขบวนไดโอดมีตัวเก็บประจุและสวิตช์เฉพาะสำหรับแต่ละไดโอด ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับวงจรรวมตัวเก็บประจุและไดโอดที่สแกนทีละความยาวคลื่น



(ก)



(ข)

รูป 3-55 แทรนซังคิวเซอร์ขบวนไดโอดเชิงเส้นแบบผกผัน (ก) พื้นที่หน้าตัด (ข) ภาพมองจากด้านบน

ความกว้างช่องเล็กยาวของแทรนซังคิวเซอร์ขบวนโฟโตไดโอดต้องปรับความกว้างของลำรังสีเข้าให้ตกเต็มพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด ขบวนโฟโตไดโอดทำหน้าที่วัดความเข้มรังสีที่ชน ข้อมูลที่วัดจะถูกเก็บไว้และส่งผลรวมสัญญาณเป็นสเปกตรัมของรังสีที่ทำการวัด

เครื่องถ่ายโอนประจุ Charge Transfer Devices

ในอดีตการทำงานของโฟโตไดโอดไม่ดีเท่ากับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ในแง่สภาพไว ช่วงความเข้มชั้น อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน เครื่องรุ่นใหม่การทำงาน of เครื่องถ่ายโอนประจุมีสมบัติใกล้เคียงกับหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ แต่เครื่องถ่ายโอนประจุมีข้อดีกว่าหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

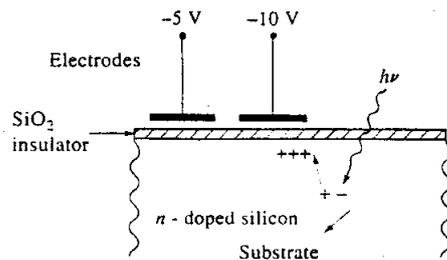
- ผลที่ต้องการวัดที่ความยาวคลื่นต่างๆ ออกมาพร้อมกัน
- เครื่องวัดเป็นแบบสองมิติ โดยธาตุที่ทำหน้าที่เป็นแทรนซังคิวเซอร์จัดอยู่เป็นแถวและคอลัมน์

เช่น จักรธาตุที่วัดเป็นแถว 244 แถว จัดเป็นคอลัมน์ 388 คอลัมน์ แทรนซังคิวเซอร์แบบสองมิติ จัดได้ถึง 19,972 จุด (pixels) โดยที่ธาตุเหล่านี้จัดบนแผ่นซิลิคอน ขนาดกว้าง 6.5 ยาว 8.7 มิลลิเมตร การจัดแบบนี้เหมาะกับเครื่องสเปกโทรที่ใช้เกรตติงแบบเอชเชล (echelle) ให้สเปกตรัมแบบสองมิติพร้อมกันทุกช่วงความยาวคลื่น

หลักการการทำงานของทรานส์ดิวเซอร์แบบถ่ายโอนประจุคล้ายกับฟิล์มรับแสง สัญญาณถูกรวมตลอดเวลาที่รังสีชนทรานส์ดิวเซอร์ รูป 3-56 แสดงพื้นที่หน้าตัดของจุดจุดหนึ่งที่เกิดการถ่ายโอนประจุ แต่ละจุดมีขั้วไฟฟ้านำไฟฟ้าสองขั้วอยู่บนชั้นฉนวนซิลิกา ชั้นฉนวนซิลิกาแยกขั้วไฟฟ้าจากชั้นที่โด๊ป (dope) เป็นชนิด n ซิลิกา เมื่อรังสี $h\nu$ ชนซิลิกาชนิด n จะเกิดโฮล อุปกรณ์ที่มีการจัดแบบนี้จะทำหน้าที่คล้ายตัวเก็บประจุ เมื่อใส่ประจุลบให้กับขั้วไฟฟ้า บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้านี้จะเกิดการผกผันประจุและเกิดโฮล โฮลเคลื่อนที่และถูกเก็บที่ขั้วไฟฟ้านี้ บริเวณนี้เรียกบ่อศักย์ (potential well) บ่อนี้เก็บประจุได้ 10^5 ถึง 10^6 ประจุนี้วิ่งออกจากบ่อไปยังจุดที่อยู่ติดกัน จากรูป 3-56 ขั้วไฟฟ้า -10 โวลต์ เป็นลบมากกว่าขั้วไฟฟ้า -5 โวลต์ ขั้วลบมากทำหน้าที่สะสมประจุ ประจุนี้ขึ้นกับปริมาณรังสีที่ชน การวัดปริมาณประจุทำได้สองวิธี คือ เครื่องวัดประจุ และเครื่องควบประจุ เครื่องวัดประจุเคลื่อนจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่งทำให้ศักย์เปลี่ยน เครื่องควบประจุ ประจุเคลื่อนไปยังเครื่องรับประจุและขยายสัญญาณออกมา

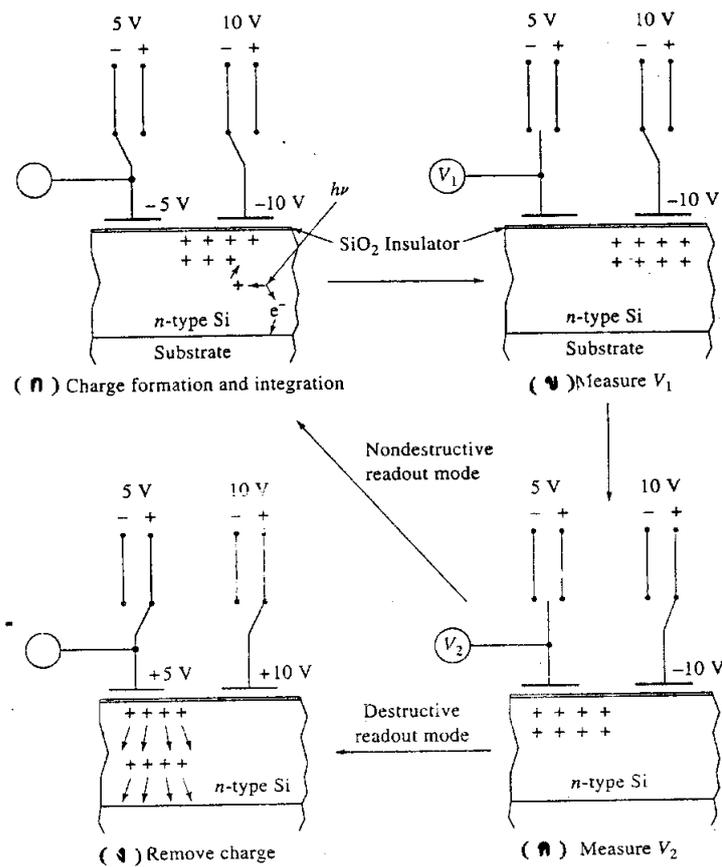
เครื่องวัดประจุ Charge Injection Devices

รูป 3-57 เป็นแผนภูมิแสดงรังสีชนจุดจุดหนึ่ง (เซมิคอนดักเตอร์หนึ่งอัน) บนเซมิคอนดักเตอร์ชนิด n ทำให้เกิดโฮล (ประจุบวก) ภาพแสดง การเก็บ สะสมและวัดประจุนี้ ตอน ก ใส่ศักย์ลบให้กับขั้วไฟฟ้าสองขั้วทำให้เกิดบ่อศักย์ (potential well) เมื่อรังสีชน



รูป 3-56 พื้นที่หน้าตัดของเครื่องตรวจหาของ CTD ในโหมดถ่ายโอนประจุ เมื่อรังสี $h\nu$ ชนทรานส์ดิวเซอร์จะเกิดโฮล หรือ ประจุบวก ขั้วลบทำหน้าที่เก็บประจุ

เซมิคอนดักเตอร์ชนิด n จะเกิดโฮล (ประจุบวก) บ่อทำหน้าที่เก็บและสะสมโฮลนี้ ขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่กล่าว ขั้วทางซ้ายมีศักย์เป็นลบน้อยกว่าขั้วทางขวา ประจุบวกทั้งหมดจะอยู่ที่ขั้วด้านขวา การเก็บประจุนี้จะเกิดในช่วงเวลาสั้น ดังขั้นตอน ข และ ค ในรูป ข ศักย์ของตัวเก็บประจุทางด้านซ้าย V_1 วัดได้จากการหยุดป้อนศักย์ดังข้อ ก ขั้นตอน ค ประจุบวกที่ถูกเก็บอยู่ที่ขั้วด้านขวาถูกถ่ายโอนไปยังบ่อศักย์ โดยการสับสวิทช์เปลี่ยนจากศักย์ที่ใส่ตอนแรกจากลบเป็นบวก ณ ช่วงนี้จะวัดศักย์ที่ขั้วนี้ได้ V_2 ปริมาณ (ขนาด) ประจุที่เก็บมีค่า $V_1 - V_2$ รูปง แทรนซิวเซอร์กลับสู่สภาพเดิม เมื่อใส่ศักย์ให้กับขั้วทั้งสองเป็นบวก ประจุบวกทั้งหมดจะวิ่งไปที่ขั้วลบตรง เครื่องวัดที่ใช้หลักการนี้เรียกว่าเครื่องควมประจุ เพราะวัดสัญญาณได้ขณะที่มีการรวมสัญญาณ



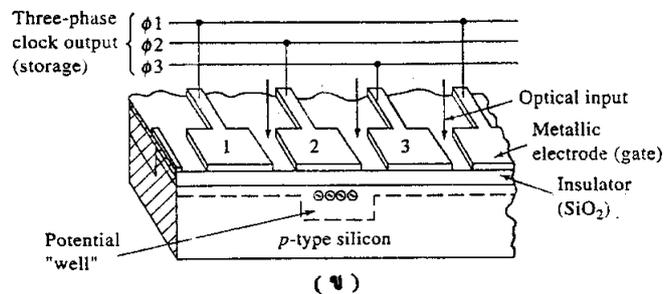
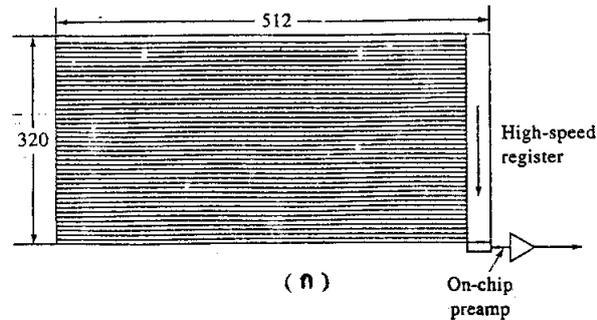
รูป 3-57 จังหวะการทำงานของเครื่องวัดประจุ (ก) การผลิตและสะสมประจุ (ข) การวัดประจุจุดแรกที่เกิดขึ้น (ค) การวัดประจุจุดที่สองหลังจากมีการถ่ายโอนประจุ (ง) การวัดประจุเข้าไปในเซมิคอนดักเตอร์

เครื่องควบประจุ Charge Coupled Devices

เครื่องควบประจุ รูป 3-58 ก แสดงการจัดแทรนซิวเซอร์ของขบวนโฟโตไดโอดขนาด 512 * 320 จุด เซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้เป็นแบบที่โคพด้วยชนิด p ซิลิคอน ตัวเก็บประจุ ได้รับศักย์บวก เมื่อรังสี hV ชนชั้นเซมิคอนดักเตอร์ชั้น p จะเกิดอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะถูกเก็บด้วยขั้วไฟฟ้าบวก (บ่อศักย์) ส่วนประจวบวงวิ่งเข้าสู่ขั้วสเตท แต่ละจุดที่วัดจะมีขั้วไฟฟ้าสามขั้ว (แทนด้วยเลข 1, 2 และ 3 ดังรูป ข) การวัดประจุที่ถูกสะสมไว้วงจรนาฬิกาสามเฟสเปลี่ยนประจุทีละขั้นไปทางขวาซึ่งมีความเร็วคงรูป ก ประจวบถูกถ่ายไปยังพรีแอมพลิฟายแล้วออกสู่ระบบอ่านสัญญาณ ข้อดีของเครื่องควบประจุ คือ สภาพไวสูง ส่วนข้อเสียอาจมีผลทำให้ระบบอ่านสัญญาณเสียเร็ว

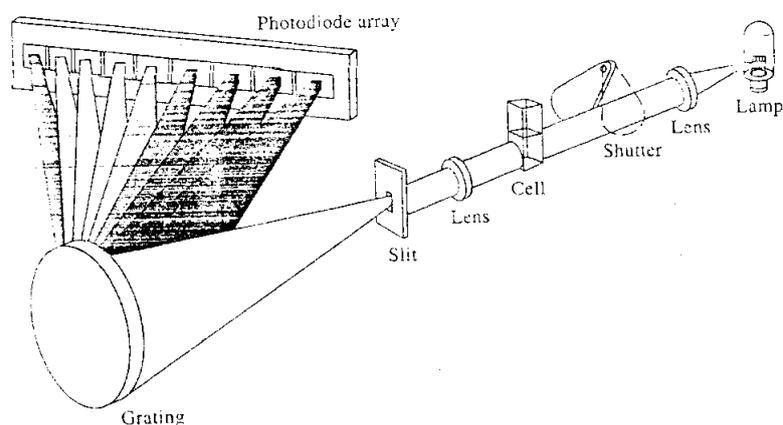
เครื่องมือขบวนไดโอด Diode Array Instruments

กลางปี ค.ศ. 1970 มีการประยุกต์ใช้ขบวนซิลิคอนไดโอดใช้วัดลำรังสี นำขบวนซิลิคอนไดโอดมาวางที่ระนาบโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์ การสแกนความยาวคลื่นเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์มากกว่าแบบเชิงกล ข้อมูลลำรังสีที่ความยาวคลื่นต่างกันถูกวัดพร้อมกันด้วยเครื่องมือหลายช่อง การวัดจึงทำได้รวดเร็ว ปี ค.ศ. 1980 บริษัทผลิตเครื่องมือหลายช่องแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronic multichannel) วัดความดูดกลืนโมเลกุลในช่วงอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิล



รูป 3-58 เครื่องควบประจุ (ก) การจัดจุดแบบ 513 * 320 (ข) แผนภูมิเครื่องตรวจหาสีอื่น

รูป 3-59 แผนภูมิทางเดินแสงสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ช่วงอัลตราไวโอเล็ตแบบหลายช่อง อุปกรณ์ที่ใช้ในทางเดินแสงมีน้อยชิ้น ลำรังสีที่ออกมาปริมาณมากกว่าเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์แบบพื้นฐาน แหล่งกำเนิดรังสีเป็นหลอดควเทอร์เรียมใช้ในช่วงวิสิเบิลด้วย (ใช้งานได้ถึง 820 นาโนเมตร) ลำรังสีในแนวขนานจากแหล่งกำเนิดชนสารละลายตัวอย่างหรือตัวทำละลาย ลำรังสีที่เหลือจากการดูดกลืนถูกโฟกัสบนช่องเล็กยาวเข้า แล้วผ่านเข้าสู่ผิวเกรตติงฮอลโลกราฟิกแบบสะท้อนแสง ขบวนการแทรกสอดิวเซอร์ทำจากธาตุ 328 ธาตุ แต่ละอันมีมิติ กว้าง 18 ขาว 0.5 มิลลิเมตร การกระจายเกรตติงและขนาดของธาตุที่ทำไดโอดมีการแยกช่วงสเปกตรัมได้ละเอียด 0.2 นาโนเมตร อุปกรณ์ทุกชิ้นในเครื่องมือนี้เป็นแบบตรึง ความต่อเนื่องในการวัดความยาวคลื่น (reproducibility) สูงมาก สัญญาณต่อการรบกวนมีค่าสูงเมื่อทำการวัดในช่วงเวลาที่เหมาะสม



รูป 3-59 สเปกโทรมิเตอร์แบบขบวนไดโอดหลายช่อง

เครื่องมือแบบนี้วัดรังสีช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร ใช้เวลาเพียง 0.1 วินาที ถ้าต้องการอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนสูงทำโดยวัดตัวอย่างนานเป็นวินาที ระบบสมองกลรวมทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเหล่านี้ก่อนส่งออกมา การวัดอย่างรวดเร็ว (ใช้ลำรังสีชนสารตัวอย่างในช่วงเวลาสั้นๆ) สารตัวอย่างไม่เกิดการสลาย แม้ว่าสารตัวอย่างจะได้รับปริมาณแสงมากกว่าเครื่องมือที่ใช้ตัวทำแสงเอกรงค์อยู่หน้าสารตัวอย่าง ความเสถียร

ของแหล่งกำเนิดรังสีและระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้วัด จะวัดเทียบกับตัวทำละลายและเก็บไว้ในระบบสมองกลทุก 5 หรือ 10 วินาที

สเปกโทรมิเตอร์ขบวนการไอโคหลายช่องจะมีระบบอินเทอร์เฟซกับเครื่องสมองกลระบบบุคคล (personal computer) ราคาเครื่องประมาณ \$ 70,000 ถึง \$ 90,000 (ไม่รวมราคาเครื่องสมองกล)

ทรานซ์ดีวเซอร์ความร้อน Thermal Transducers

ทรานซ์ดีวเซอร์ที่กล่าวมาแล้วไม่เหมาะกับการวัดรังสีอินฟราเรดเนื่องจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมีความเข้มข้นและมีพลังงานต่ำ วัสดุไวแสงไม่คายอิเล็กตรอนออกมา ทรานซ์ดีวเซอร์รังสีอินฟราเรด (ความร้อน) ใช้หลักการให้รังสีวัตถุขนาดเล็ก (black body) วัสดุนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้น รังสีอินฟราเรดมีความเข้มข้น (10^{-7} ถึง 10^{-9} วัตต์) ความจุความร้อนของวัสดุที่ดูดกลืนต้องไวพอที่รับความเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น วัสดุที่รับความร้อนจัดให้มีขนาดเล็กและมีความหนาพอเหมาะเพื่อรับความร้อนเป็นเศษส่วนพันเคลวิน

การวัดรังสีความร้อนมีผลจากการรบกวนอุณหภูมิ (thermal) จากสิ่งแวดล้อม ทรานซ์ดีวเซอร์จึงต้องจัดไว้ในห้องสุญญากาศและมีฉนวนกันความร้อนที่มาจากแหล่งอื่น การลดการรบกวนความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่ไม่ต้องการจึงสืบสัญญาณจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดเป็นจังหวะ สัญญาณที่วัดได้เป็นแบบจังหวะจึงไม่มีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม

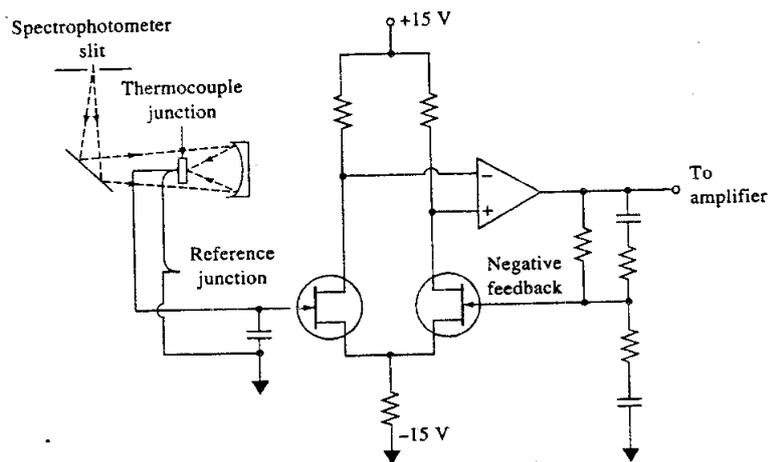
อุปกรณ์ที่ใช้หลักการวัดความร้อนทำงานได้ในช่วงความยาวคลื่นกว้างดังรูป 3-56 ทรานซ์ดีวเซอร์แบบนี้ทำงานที่อุณหภูมิห้อง ใช้วัดรังสีช่วงวิสิเบิลและอินฟราเรด ข้อเสียของทรานซ์ดีวเซอร์แบบนี้ มีการตอบสนองสัญญาณช้า (มิลลิวินาที) และมีสภาพไวต่ำ เมื่อเทียบกับทรานซ์ดีวเซอร์ชนิดอื่น และมีการรบกวนของความร้อนจากสภาพแวดล้อม ทรานซ์ดีวเซอร์แบบนี้ต้องจัดไว้ในห้องสุญญากาศ และมีชุดกันรังสีความร้อนจากแหล่งอื่น การลดความร้อนจากแหล่งอื่นทำโดยการมอดูเลตรังสีที่ชน หรือ สับ (chop) หรือทำเป็นพัลส์ (จังหวะ) สัญญาณที่ได้จากทรานซ์ดีวเซอร์จึงไม่มีสัญญาณการรบกวนจากแหล่งกำเนิดความร้อนอย่างต่อเนื่อง

เทอร์มอคัพเพิล Thermocouple

เทอร์มอคัพเพิลเป็นทรานซ์คิวเซอร์ชนิดธรรมดาที่สุด เทอร์มอคัพเพิลประกอบด้วยโลหะสองชนิด นำปลายทั้งสองมาหลอมติดกัน โลหะสองชนิดต้องมีสมบัติในการนำความร้อนต่างกัน เช่นบิสมัทและแอนติโมนี (พลวง) เมื่ออุณหภูมิระหว่างรอยต่อทั้งสองต่างกันจะเกิดศักย์ขึ้น

รอยต่อของทรานซ์คิวเซอร์อินฟราเรดทำจากลวดขนาดเล็ก หรือ เคลือบโลหะที่นำความร้อนดีบนแผ่นที่ไม่เป็นตัวนำ รอยต่อนี้มักฉาบด้วยสีดำ (เพิ่มความสามารถในการดูดความร้อน) ด้านรอยต่ออ้างอิงต้องไม่ไวต่อแสงอินฟราเรด (ความร้อน) มีที่กันไม่ให้แสงอินฟราเรดชน เมื่อนำโลหะที่ไวต่อแสงอินฟราเรดและโลหะที่เป็นตัวอ้างอิงมาหลอมให้ปลายทั้งสองติดกัน และจัดไว้ในห้องที่เอาอากาศออก มีหน้าต่างให้แสงอินฟราเรดผ่าน เมื่อรังสีอินฟราเรดชนทรานซ์คิวเซอร์นี้ อุณหภูมิระหว่างรอยต่อทั้งสองต่างกันจึงเกิดศักย์ขึ้นระหว่างรอยต่อทั้งสอง สัญญาณที่วัดได้ถูกสับเป็นจังหวะ การรบกวนจากแบล็คกราวนด์ตัดทิ้งได้ รอยต่ออ้างอิงไม่จำเป็นต้องมีอุณหภูมิคงที่ การเพิ่มสภาพไวทำโดยใช้เทอร์มอคัพเพิลหลายอันมาต่อกันแบบอนุกรม วิธีการนี้เรียก เทอร์มอไพล์ (Thermopile)

ทรานซ์คิวเซอร์เทอร์มอคัพเพิลที่ออกแบบดีตอบสนองต่ออุณหภูมิต่างกัน 10⁻⁶ เคลวิน ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าประมาณ 6 ถึง 8 ไมโครโวลต์ต่อวัตต์ ทรานซ์คิวเซอร์รังสีอินฟราเรดด้วยเทอร์มอคัพเพิลจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำต่อกับพรีแอมพลิฟายเออร์ อิมพีแดนซ์สูง และใช้วงจรฟิลต์เอพเฟคทีฟทรานซิสเตอร์ ดังรูป 3-60



รูป 3-60 เทอร์มอคัพเพิลและพรีแอมพลิฟายเออร์

โบลอมิเตอร์ (Bolometer)

โบลอมิเตอร์เป็นเทอร์มอมิเตอร์แบบความต้านทาน แทรนซ์ดิวเซอร์แบบนี้ทำจากแผ่นโลหะ เช่นแพลทินัม หรือ นิกเกิล หรือใช้เซมิคอนดักเตอร์ แทรนซ์ดิวเซอร์แบบนี้เรียก เทอร์มิสเตอร์ เมื่อรังสีอินฟราเรด (ความร้อน) ชนวัสดุนี้มีผลให้ความต้านทานเปลี่ยน (ความต้านทานลดลง) ชาติที่ไวต่อความร้อนจะเคลือบสีค่าเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดรังสีอินฟราเรด (ความร้อน) แทรนซ์ดิวเซอร์โบลอมิเตอร์ หรือ เทอร์มิสเตอร์ ใช้หลักการความต้านทาน ด้านอ้างอิงความต้านทานไม่เปลี่ยนส่วนด้านที่รับแสงอินฟราเรดความต้านทานลดลง จึงเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น แทรนซ์ดิวเซอร์ชนิดนี้ไม่ค่อยนิยมใช้วัดรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง สำหรับโบลอมิเตอร์ เจอร์เมเนียมใช้วัดรังสีในช่วงอินฟราเรดถึง 400 ต่อเซนติเมตร (2000 ถึง 25 มิลลิเมตร)

แทรนซ์ดิวเซอร์ไพโรอิเล็กทริก Pyroelectric Transducers

แทรนซ์ดิวเซอร์ไพโรอิเล็กทริกทำจากผลึกเชิงเดี่ยวเป็นชั้นบางของวัสดุไพโรอิเล็กทริก วัสดุนี้เป็นฉนวน หรือ ไดอิเล็กทริก ที่ตอบสนองต่ออุณหภูมิและสนามไฟฟ้า ไตรไกลซีนซัลเฟต ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$)₃ · H_2SO_4 (มักแทนที่อะตอม ไฮโดรเจนด้วยคิวเทอริยม หรือโซลานีนแทนไตรไกลซีนซัลเฟตเพียงเล็กน้อย) ไตรไกลซีนซัลเฟตเป็นวัสดุไพโรอิเล็กทริกใช้เป็นแทรนซ์ดิวเซอร์อินฟราเรด

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าคร่อมวัสดุไพโรอิเล็กทริกจะเกิดการโพลาไรส์สนามไฟฟ้า ขนาดการโพลาไรส์ขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ วัสดุไดอิเล็กทริกส่วนใหญ่เกิดการสลายสนามที่ถูกโพลาไรส์อย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่อเอาสนามภายนอกออก สารพวกไพโรอิเล็กทริกยังคงมีสนามที่ถูกโพลาไรส์อยู่แม้ว่าจะเอาสนามภายนอกออก สนามที่ถูกโพลาไรส์ขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่อนำผลึกไพโรอิเล็กทริกวางไว้ระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว (ขั้วหนึ่งให้แสงอินฟราเรดผ่านได้) เมื่อมีแสงอินฟราเรดชนผลึกไพโรอิเล็กทริก อุณหภูมิที่ผิวผลึกจะเพิ่มขึ้น การกระจายของประจุบริเวณผิวเปลี่ยนทำให้เกิดกระแส กระแสนี้ถูกวัดด้วยวงจรไฟฟ้าภายนอกที่ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (ตัวเก็บประจุ) ขนาดของกระแสที่วัดได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวผลึกและอัตราการเปลี่ยนแปลงมีขั้วได้กับอุณหภูมิที่เปลี่ยน ผลึกไพโรอิเล็กทริกจะไม่เกิดการมีขั้วเมื่อรังสีที่ชนมีอุณหภูมิเกินค่าหนึ่ง จุดนี้เรียก จุดคูรี เช่น ไตรไกลซีนซัลเฟต จุดคูรีเท่ากับ 47 องศาเซลเซียส

แทรกซ์คิวเซอร์ไพโรอิลิกทรินคอบสนองเร็วจึงหาการเปลี่ยนสัญญาณเวลาโดเมนจากมาตรแทรกสอดได้ (interferometer) ฟลูเรียร์แทรกซ์ฟอรมอินฟราเรดใช้แทรกซ์คิวเซอร์ไพโรอิลิกทริน

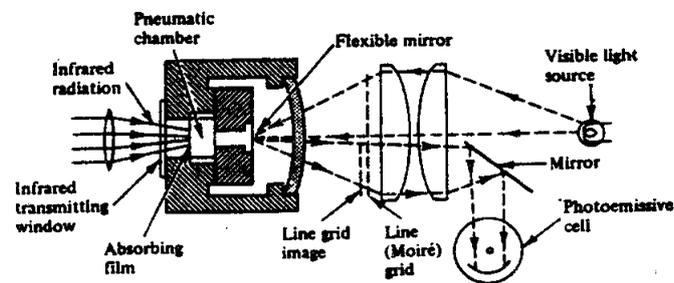
โกเลย์นิวมาติก Golay Pneumatic

โกเลย์นิวมาติกใช้หลักการขยายตัวของก๊าซ ดังรูป 3-61 บริเวณรับรังสีเป็นโลหะรูปทรงกระบอกกลวงขนาดเล็ก ด้านหนึ่งหุ้มด้วยแผ่นโลหะดำมีพื้นที่ 2 ตารางมิลลิเมตร ด้านตรงข้ามมีแผ่นเงินที่เคลื่อนไหวได้ ภายในกล่องบรรจุก๊าซซีนอน เมื่อมีรังสีพลังงานน้อย (อินฟราเรด) ผ่านหน้าต่าง วัสดุจะดูดกลืนรังสีและมีความร้อนเพิ่มขึ้น ความร้อนนี้จะถูกส่งให้ก๊าซซีนอน ก๊าซนี้จะเกิดการขยายตัวมีผลทำให้แผ่นเงินเคลื่อนไหว แทรกซ์คิวเซอร์ชนิดนี้ใช้หลอดวัดแสงวัดปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดแสง ภายในแทรกซ์คิวเซอร์จะมีแผ่นโลหะเงินโพกัสรังสีเข้าสู่หลอดวัดแสง หลอดวัดแสงจะวัดรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีได้คงที่เมื่อไม่มีรังสีวิ่งชนด้านหน้า ถ้ามีรังสีอินฟราเรดวิ่งชนโลหะกลวงที่มีก๊าซซีนอน แผ่นโลหะจะเคลื่อนไหว มีผลให้หลอดวัดแสงวัดปริมาณรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีได้น้อย ปริมาณรังสีที่วัดได้ลดลงขึ้นกับปริมาณรังสีอินฟราเรด

แทรกซ์คิวเซอร์แบบนี้ราคาแพงกว่าแทรกซ์คิวเซอร์ความร้อนแบบอื่น และไม่ไวต่อรังสีอินฟราเรดช่วงใกล้และช่วงกลาง แทรกซ์คิวเซอร์นี้ไวต่อรังสีความยาวคลื่นมากกว่า 50 ไมโครเมตร (< 200 ต่อเซนติเมตร) หรือรังสีอินฟราเรดช่วงไกล

แทรกซ์คิวเซอร์สภาพนำแสง Photoconducting Transducers

แทรกซ์คิวเซอร์สภาพนำแสงในช่วงอินฟราเรด ทำจากแผ่นบางๆ ของวัสดุกึ่งตัวนำ เช่น ตะกั่วซัลไฟด์ โปรอท/แคดเมียมเทลลูไรด์ (Telluride) หรืออินเดียมแอนติโมนด์



รูป 3-61 โกเลย์นิวมาติก

เคลือบบนผิวแก้ว (ไม่เป็นตัวนำ) และจัดไว้ในห้องที่เอาอากาศออก (ไม่ให้เขมิกอนคัคเตอร์ถูกกับอากาศ) เมื่อรังสีอินฟราเรดชนวัสดุนี้ อิเล็กตรอนที่อยู่บนผิวซึ่งไม่นำไฟฟ้าจะรับพลังงานทำให้เกิดสภาพนำ เขมิกอนคัคเตอร์ลดความต้านทานไฟฟ้า แทรนซ์ดีวเซอร์สภาพนำแสงจัดเป็นแบบอนุกรมกับแหล่งให้ศักย์และตัวรีซิสเตอร์ ศักย์ที่ลดลงตรงบริเวณผิวรีซิสเตอร์ทำหน้าที่วัดกำลังรังสีอินฟราเรด

แทรนซ์ดีวเซอร์สภาพนำแสงตะกั่วซัลไฟด์ใช้งานช่วงไกลอินฟราเรด (10,000 ถึง 333 ต่อเซนติเมตร หรือ 1 ถึง 3 ไมโครเมตร) ทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง แทรนซ์ดีวเซอร์สภาพนำแสงปรอท/แคดเมียม เทลลูไรด์ใช้งานช่วงกลางและไกลอินฟราเรด แทรนซ์ดีวเซอร์นี้ต้องอยู่ในที่เย็นจัด ใช้ไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) เพื่อลดการรบกวนความร้อน

แทรนซ์ดีวเซอร์สภาพนำแสงปรอท/แคดเมียม เทลลูไรด์ คิดว่าแทรนซ์ดีวเซอร์ไพโรอิเล็กทริก และนิยมใช้กับเครื่องสเปกโทรฟลูอริเมตริกซ์ฟอรัมโดยเฉพาะกับ เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีกับเครื่องฟลูอริเมตริกซ์ฟอรัมแมสสเปกโทร

ระบบควบคุมสัญญาณและระบบอ่านสัญญาณ Signal Processor and Readout

ระบบควบคุมสัญญาณ ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าขยายสัญญาณจากไฟฟ้าจากแทรนซ์ดีวเซอร์ อุปกรณ์นี้ยังทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณกระแสตรงเป็นสัญญาณกระแสสลับ (เปลี่ยนเฟสของสัญญาณและกรองเอาสัญญาณที่ไม่ต้องการออก) ระบบควบคุมสัญญาณทำหน้าที่แยกสัญญาณที่ต่างกันออกจากกัน หรือรวมสัญญาณ หรือเปลี่ยนเป็นสัญญาณลอการิทึม ระบบอ่านสัญญาณเป็นแบบตัวเลข เข็มวัด สเกลโพเทนชิออมิเตอร์ เครื่องบันทึก หลอดรังสีแคโทด

เครื่องนับโฟตอน Photon counting

สัญญาณที่ได้จากโฟตอนชนผิวหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เป็นอิเล็กตรอนแบบจิงหวะ (พัลส์) สัญญาณแอนาล็อกถูกกรองและขจัดสัญญาณที่ไม่คืออกและวัดในรูปศักย์หรือ กระแสตรง ถ้าความเข้มรังสีที่วัดมีค่าน้อยการเปลี่ยนสัญญาณจากแอนาล็อกเป็นดิจิทัลช่วยให้สัญญาณต่อการรบกวนสูงขึ้น กำลังรังสีที่วัดได้จากแทรนซ์ดีวเซอร์แปร โดยตรงกับจำนวนพัลส์ต่อเวลาที่วัดมากกว่าค่าเฉลี่ยกระแสหรือโฟตอน เทคนิคการวัดแบบนี้เรียกการนับโฟตอน

เทคนิคการนับโฟตอนยังใช้นับลำรังสีเอกซ์ และรังสีที่ได้จากการสลายของสารกัมมันตรังสี เทคนิคการนับโฟตอนที่ใช้วัดรังสีในช่วงวิสิเบิลและอัลตราไวโอเล็ต เมื่อรังสี(โฟตอนหนึ่งชุด)ชนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์จะเกิด กลุ่มอิเล็กตรอน 10^6 ถึง 10^7 ตัว และให้กระแสเป็นแบบพัลส์และถูกขยายและนับ เครื่องนับโฟตอนจะวัดสัญญาณที่น้อยกว่าค่าต่ำสุดที่ตั้งไว้ (คัท) เทคนิคนี้จึงเพิ่มค่าสัญญาณต่อการรบกวน

การนับโฟตอนมีข้อดีว่าการนับสัญญาณไฟฟ้า (ระบบคูณสัญญาณไฟฟ้า) ให้สัญญาณต่อการรบกวนเพิ่มขึ้น ไวต่อรังสีที่มีความเข้มน้อย ให้ความเที่ยงสูงกว่า อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขณะวัดมีผลน้อย เทคนิคนี้นิยมใช้กับเครื่องวัดการดูดกลืนโมเลกุลในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล เทคนิคนี้ยังใช้กับเครื่องวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนซ์ เคมีลูมิเนสเซนซ์ และรามัน แม้ว่ารังสีที่วัดจะมีปริมาณน้อย

เส้นใยนำแสง Fiber Optics

ปลายปี 1960 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ขายในตลาดใช้เส้นใยนำแสงสำหรับส่งผ่านรังสีจากแหล่งกำเนิด และรับ (ส่ง) ภาพ หรือ รังสีเข้าสู่เครื่องตรวจหา

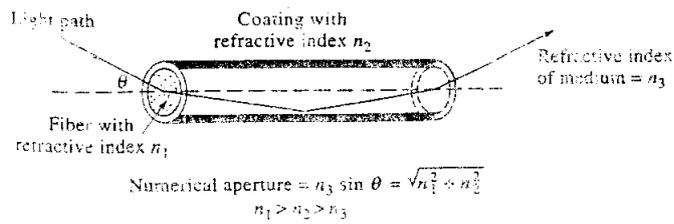
สมบัติของเส้นใยนำแสง Properties of Optical Fibers

เส้นใยนำแสงได้จากแก้ว หรือ พลาสติกมายืดเป็นเส้นเล็กและนำมาขดเป็นเกลียวแล้วนำมามัดเป็นหมู่ หลอมปลายเข้าด้วยกัน เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยนำแสงมีค่าจาก 0.05 ไมโครเมตร ถึง 0.6 เซนติเมตร เครื่องมือแพทย์นิยมใช้เทคนิคนี้วิเคราะห์ผู้ป่วย เพราะเส้นใยนำแสงงอได้ สอดผ่านอวัยวะต่างๆ ได้สะดวก เส้นใยนำแสงยังใช้เป็นแหล่งให้แสงผ่าน (กำเนิดแสง) สำหรับส่องดูอวัยวะต่างๆ ภายในร่างกาย

เมื่อแสงผ่านเข้าไปในเส้นใยนำแสงจะเกิดการสะท้อนภายในคังรูป 3-59 เส้นใยนำแสงที่ยอมให้แสงผ่านได้ต้องเคลือบเส้นแก้ว หรือ พลาสติกด้วยวัสดุที่มีค่า ครรชนหักเห น้อยกว่าครรชนหักเหของวัสดุที่ทำเส้นใย เช่น แก้วที่นำมาทำเส้นใยมี n_1 1.6 ต้องเคลือบด้วยสารที่มี n_2 1.5 ถ้าใช้พลาสติกพอลิเมทิลเมทาครีเลต n_2 1.5 จะเคลือบด้วยสารที่มี n_2 1.4

เส้นใยนำแสงที่นำมาใช้กับรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิล หรือ อินฟราเรด ต้องทำจากวัสดุที่เหมาะสม

เส้นใยนำแสงในรูป 3-62 แสงที่เข้าสู่เส้นใยทำมุม θ เส้นใยจะยอมให้แสงผ่านเข้าไปทำมุม $1/2 \theta$ ช่องนิวเมอริกัล (numerical aperture) ของเส้นใยเป็นการวัดขนาดของรังสีรูปทรงกรวยที่ผ่านออกมา (acceptance cone)



รูป 3-62 แผนภูมิทางเดินแสงที่ผ่านเส้นใยนำแสง

เครื่องรับสัญญาณของเส้นใยนำแสง Fiber Optic Sensors

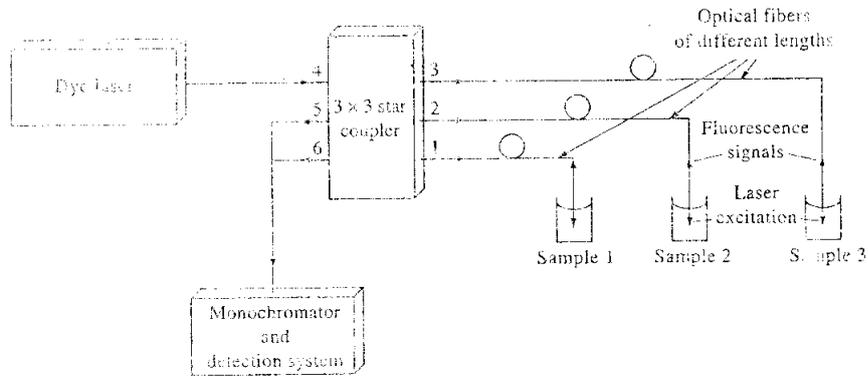
เครื่องรับสัญญาณของเส้นใยนำแสงเรียก ออปโทโรด (optrode) ออปโทโรดทำจากเฟสของรีเอเจนต์ที่เคลื่อนที่ไม่ดีติดอยู่กับปลายด้านหนึ่งของเส้นใยนำแสง เมื่อจุ่มเส้นใยนำแสงลงในสารที่ต้องการวิเคราะห์ สารที่วิเคราะห์จะเกิดอันตรกิริยากับรีเอเจนต์ที่ปลายเส้นใย และให้ค่าความคลาดเคลื่อน อัตราความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่สะท้อนกับรังสีที่ตกบนพื้นผิว ฟลูออเรสเซนซ์ หรือ ลูมิเนสเซนซ์ ที่เปลี่ยน สัญญาณเหล่านี้ถูกส่งผ่านทางเส้นใยนำแสงเข้าสู่เครื่องตรวจหา เครื่องรับรู้จากเส้นใยนำแสงเป็นแบบง่ายๆ ราคาถูก มีขนาดกะทัดรัด

การใช้เส้นใยนำแสงแบ่งแยกเวลาระหว่างสัญญาณที่วิเคราะห์ Fiber Optics for Time Discrimination among Signal

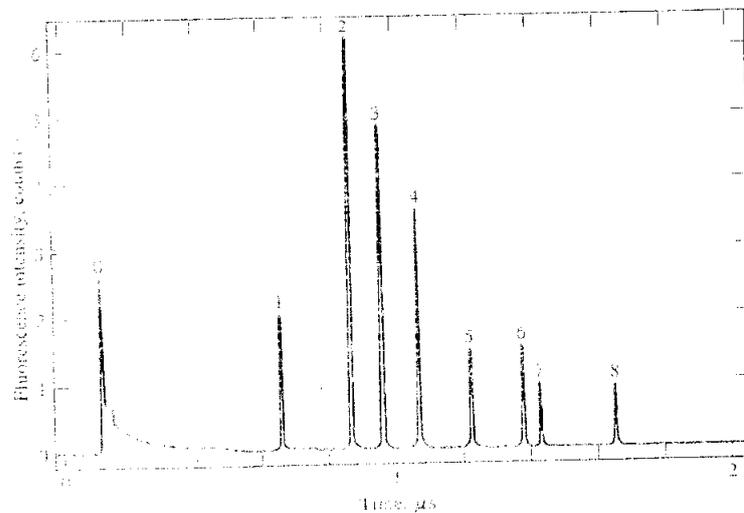
เมื่อใช้เส้นใยนำแสงหลายชุดแต่ละชุดมีความยาวเส้นใยต่างกัน แสงจะใช้เวลาเดินทางเข้าสู่เครื่องตรวจหาสัญญาณแสงด้วยเวลาต่างกัน เทคนิคนี้วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีสารที่สนใจหลายชนิดโดยใช้เครื่องตรวจหาอันเดียวกัน สัญญาณที่ได้จากสารแต่ละตัวใช้เวลาต่างกัน รูป 3-63 ก แสดงวิธีการจัดอุปกรณ์สำหรับวัด หัวใจของระบบเครื่องตรวจหาคือเครื่องควบคู่สตาร์ (star coupler) อุปกรณ์นี้จัดเป็น $N \times N$ ตัวแรกเป็นช่องสัญญาณเข้า N ตัวหลังเป็นจำนวนช่องสัญญาณออก ตัวอย่างเครื่องควบคู่ 3×3 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเข้าสู่เส้นใยหนึ่งเส้น แล้วแสงนี้ถูกแบ่งโดยเครื่องควบคู่ให้เส้นใยทั้งหมดเส้น โดยแต่ละเส้นมีความเข้มเท่ากัน (รวมทั้งเส้นใยจากแหล่งกำเนิดแสง) ประสิทธิภาพของเครื่องควบคู่นี้น้อยกว่า ร้อยละ 100 เพราะแสงสูญเสียขณะที่ถูกแบ่งที่ห้องควบ เครื่องควบ

คู่มือ หรือการจัด $1N + 1N$ จะเห็นว่ามีทั้งช่องช่อง ($2N$ เมื่อ N เท่ากับ 1) มีปริมาณแสงที่กลมกลืนทุกช่องมีอยู่ในสหวิทยา

รูป 3-63 ความเข้มฟลูออเรสเซนซ์ของสารตัวอย่างวัดได้ ณ เวลาต่างๆ แสงจากเลเซอร์ที่โพลาไรซ์ด้วยโพลาไรเซอร์ (จีรหระ) ผ่านเข้าสู่เส้นใยนำแสงทางช่องที่ 4 เข้าสู่เครื่องควบคุม เครื่องควบคุมนี้แบ่งลำแสงเป็นหกลำแสง โดยแต่ละลำแสงมีความเข้มเท่ากัน ลำแสงหนึ่งไปตามเส้นใยนำแสงที่ 1, 2 และ 3 (ความเข้ม $3/6$) เส้นใยนำแสงทั้งสามมีความเข้มไม่เท่ากัน ลำแสงหนึ่งลำแสงกลับเข้าสู่แหล่งกำเนิดแสงตามเส้นใยนำแสงที่ 4 (ความเข้ม $1/6$) อีกสองลำแสงไปตามเส้นใยนำแสงที่ 5 และ 6 (ความเข้ม $2/6$) เข้าสู่



(ก)



(ข)

รูป 3-63 เครื่องมือ เมื่อที่ใช้รังสีจากแหล่งกำเนิดกระตุ้นสารตัวอย่างและอุปกรณ์วัดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์ โดยใช้หลักการจับเวลาสัญญาณที่เข้าสู่เครื่องตรวจหา (ก) การจัดอุปกรณ์ฟลูออเรสเซนซ์ (ข) สัญญาณที่ได้จากเครื่อง

ตัวทำแสงเอกรงค์ และแทรกซ์คิวเซอร์ วัดความเข้มและช่วงเวลา บริเวณปลายเส้นใยเส้นที่ 1,2 และ 3 จุ่มในสารละลายตัวอย่าง 3 ตัวอย่าง ลำแสงที่เข้าสู่เส้นใยทั้งสามทำหน้าที่กระตุ้นสารที่ต้องการวิเคราะห์ (การกระตุ้นเป็นแบบจังหวะ) สารที่วิเคราะห์เปล่งรังสีฟลูออเรสเซนซ์เป็นแบบจังหวะผ่านเข้าสู่เส้นใยเคม โดยวิ่งสวนทางดั่งลูกศร แล้วเข้าสู่เครื่องควบคุมสตาร์โดยรังสีฟลูออเรสเซนซ์ของตัวอย่างทั้งสามตัว (แต่ละเส้นยาวไม่เท่ากัน) ใช้เวลาเดินทางต่างกัน รังสีฟลูออเรสเซนซ์จากตัวอย่างหนึ่งผ่านมาทางเส้นใยที่หนึ่งเข้าสู่เครื่องควบคุม และแบ่งความเข้มรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่หนึ่งออกเป็นหกความเข้มเท่าๆ กัน ผ่านเข้าสู่เส้นใยที่ห้าและหก และผ่านเข้าสู่ตัวทำแสงเอกรงค์และเข้าสู่เครื่องตรวจหา ซึ่งทำหน้าที่แยกเวลาเป็น 10^{-9} วินาที ทำนองเดียวกันรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เปล่งจากตัวอย่างที่สองผ่านเส้นใยนำแสงสอง เข้าสู่เครื่องควบคุม แล้วผ่านเส้นใยนำแสงที่ห้าและหก ผ่านเข้าสู่ตัวทำแสงเอกรงค์ และเครื่องตรวจหา ตัวอย่างที่สามก็เกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกับตัวอย่างที่หนึ่งและสอง

การพล็อตสัญญาณความเข้มฟลูออเรสเซนซ์เทียบกับเวลาที่ใช้นับโดยใช้เทคนิคเส้นใยนำแสงและเครื่องตรวจหาแบบช่องเดียว แสดงในรูป 3-63 ข รูปนี้วัดพิคได้ 8 พิค ระบบที่ใช้มีการจัดเป็น 8×8 หรือ เครื่องควบคุมสตาร์ 8×8 แสดงว่าวัดตัวอย่างได้ 8 ตัว จากสเปกตรามี 9 พิค พิคแรกแทนด้วย 0 เป็นเวลาที่สัญญาณจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่ใช้กระตุ้น พิค 1 แทนสารละลายอ้างอิงที่ใช้แทนตัวอย่างที่หนึ่ง เพื่อแก้ความเข้มพิคอื่น (7 พิค) เนื่องจากความเข้มแหล่งกำเนิดไม่คงที่ พิคที่ 2 ถึง 8 เป็นความเข้มฟลูออเรสเซนซ์จาก 7 ตัวอย่าง ความเข้ม (ขนาด) พิคแทนความเข้มชั้นสารที่วิเคราะห์ 2-(1-แนพทิล) -5- ฟินิลออกซาโซล ในตัวอย่าง ช่วงความเข้มขั้นที่ได้กว้างถึงสามเท่าของความเข้มขั้นตัวต่ำสุดที่เหมาะสม ซึ่คจำกัดการวิเคราะห์มีค่าเป็นมิลลิโมลาร์ หรือ ต่ำกว่า

เส้นใยนำแสงที่ใช้ในการวิเคราะห์แปรความยาวจาก 4 เมตร ถึง 142 เมตร ลำรังสีเลเซอร์แบบจังหวะมีการหน่วงประมาณ 50 นาโนวินาที หรือ 0.05 ไมโครวินาทีทุกๆ ความยาวเส้นใย 10 เมตร วงจรอิเล็กทรอนิกส์รุ่นใหม่แบ่งแยกสัญญาณที่ต่างกันบนแกนเวลาได้ การใช้เครื่องควบคุมสตาร์สองชุดมารวมกัน จะช่วยให้การวัดตัวอย่างได้พร้อมกัน (เร็วขึ้น) เช่น การรวมเครื่องควบคุมสตาร์ 3×3 กับเครื่องควบคุมสตาร์ 8×8 สามารถวัดตัวอย่าง 10 ตัว ได้พร้อมกัน (เกือบจะพร้อมกัน)

รูปแบบเครื่องมือวัดแสง Types of Optical Instruments

เครื่องสเปกโทรเซกซ์แสงที่มีขายทั่วไป ใช้หลักการวัดการดูดกลืน การเปล่ง และ ฟลูออเรสเซนซ์ การออกแบบเครื่องเหล่านี้จะคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของเทคนิคเหล่านี้

การเรียกชื่อเครื่องเชิงแสง

สเปกโทรสโกป Spectroscope

เครื่องมือเชิงแสงใช้เส้นเปล่ง เครื่องมือประกอบด้วยตัวทำแสงเอกรงค์ ดังรูป 11 - 19 ตรงช่องเล็กยาวออกมีเลนส์ใกล้ตาที่เลื่อนได้ตามระนาบโฟกัส เส้นความยาวคลื่นเปล่งมาจากผลของมุมตกและลำรังสีที่กระจายจากเกรตติงหรือปริซึม แล้ววัดด้วยเลนส์ใกล้ตา

มาตรสี Colorimeter

เครื่องมือวัดความดูดกลืนโดยใช้ชั้นตาแทนแทรนซ์ดิวเซอร์ โดยใช้สีของสาร มาตรฐานเทียบกับสีตัวอย่าง

มาตรแสง Photometer

เครื่องมือประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง ฟิลเตอร์ แทรนซ์ดิวเซอร์โฟโตอิเล็กทริก กระบวนการควบคุมและอ่านสัญญาณ มาตรแสงใช้วัดการดูดกลืน ช่วง อัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิล อินฟราเรด วัดการเปล่งและฟลูออเรสเซนซ์ เครื่องมือที่ใช้วัด ฟลูออเรสเซนซ์เรียก ฟลูออโรมิเตอร์

สเปกโทรกราฟ Spectrograph

เครื่องมือที่ใช้อุปกรณ์แยกแสงเป็นตัวทำแสงเอกรงค์ บริเวณที่แสงออกมีฟิล์มถ่ายภาพหรือแผ่นรับแสง รังสีของทุกธาตุที่กระจายออกมาถูกวัดพร้อมกัน เครื่องมือนี้คล้าย เครื่องที่มีแทรนซ์ดิวเซอร์หลายตัวซึ่งวัดได้หลายช่อง เช่น ขบวนการซิลิคอน หรือขบวนการไดโอด

มาตรสเปกโทร Spectrometer เครื่องที่มีช่องเล็กยาวออกตั้งบนระนาบโฟกัส ส่วนมาตรสเปกโทรโฟโต (Spectrophotometer) ที่ระนาบโฟกัสจะมีเครื่องตรวจ

พาไฟโต มาตรผลปกโทร และมาตรผลปกโทรไฟโตเป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ตรวจสอบความถี่ของ
วัดช่องเคียว วัดใบร่วง อัตราไวโอเล็ต วิลเบ็ด และอินฟราเรด มาตรผลปกโทรไฟโตที่
ใช้วัดรังสีฟลูออเรสเซนซ์ เรียก มาตรผลปกโทรฟลูออเรสเซนซ์ (Spectrofluorometer)
ซึ่งใช้วัดการดูดกลืน และการเปล่งในช่อง อัตราไวโอเล็ต วิลเบ็ด และอินฟราเรด

รูปแบบของเครื่องมือเชิงแสง

เครื่องผลปกโทรออกแบบให้ทำงานในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมให้ข้อมูลเกี่ยวกับ
กับความเข้มหรือกำลังของลำรังสี พื้นฐานในการออกแบบเครื่องมือขึ้นกับวัตถุประสงค์
ของการใช้งานซึ่งมี 3 แบบ แบบ temporal แบบ spatial และแบบ multiplex ที่
ตามแบบแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้สองกลุ่มเหมือนกันคือ แบบกระจาย dispersive และแบบไม่
กระจาย nondispersive.

แบบ temporal เครื่องมือแบบนี้มีเครื่องตรวจหาฟิสิกส์อินทรีย์ การวัดปริมาณรังสี
วัดที่ละความยาวคลื่น เครื่องมือแบบไม่กระจาย มาตรแสงมีชุดฟิลเตอร์ซึ่งยอมให้แสงผ่าน
ช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ ผ่าน เช่นการวิเคราะห์ปริมาณโซเดียมโดยเทคนิคการเปล่งแสง
โดยผ่านสารละลายเกลือโซเดียมเข้าปลวไฟ การวัดความเข้มเส้นสเปกตรัมที่อยู่ห่างออกไป
มากต้องเปลี่ยนฟิลเตอร์ที่เหมาะสมเข้าไปแทนที่ การหาปริมาณสารตัวอย่างทำโดยวัดความ
เข้มเส้นของสารนี้เทียบกับสารมาตรฐาน

การใช้แสงเลเซอร์ที่ปรับความยาวคลื่นเพื่อศึกษาสเปกตรัมของแก๊สหรือของเหลว
ประกอบด้วยใช้หลอดไฟโตมัลติเพล็กซ์วัดปริมาณแสงจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์จาก
ความยาวคลื่นหนึ่งไปอีกความยาวคลื่นหนึ่ง เครื่องแบบไม่กระจายใช้งานสะดวก องค์
ประกอบของเครื่องมือไม่ซับซ้อน ราคาเครื่องมือแพง ปริมาณรังสี (แสง) ผ่านมาก (ทำให้
สัญญาณต่อการรบกวนสูง) และมีแรงกลไกน้อย เครื่องแบบนี้ให้รายละเอียดผลปกโทร
น้อย จึงใช้ศึกษาโครงสร้างสาร และทำคุณภาพวิเคราะห์ได้ไม่ดี

เครื่องแบบกระจาย ใช้ตัวทำแสงออร์บ์เป็นเกรตติง หรือ ปริซึม เป็นตัวเลือก
ความยาวคลื่นให้ออกคู่ช่องเล็กยาวออก และมีเครื่องตรวจหาชนิดโฟโตอิเล็กทริก
สเปกโทรมิเตอร์ได้จากการหมุนมุมเกรตติง หรือ ปริซึม เครื่องแบบนี้เลือกความถี่โดย
ความยาวคลื่น (A sequential linear scan instrument) เครื่องแบบนี้ใช้โมเดออร์หมุนมุม
เกรตติง หรือ ปริซึม ด้วยความเร็วคงที่ เพื่อให้ความยาวคลื่นในช่วงความยาวคลื่นของ

แผ่นโลหะที่สนใจ (เป็นเครื่องเขียนกราฟที่ขึงอยู่ กระดาษและปากกาสองเครื่องนั้นก็จะ
ทำงานสัมพันธ์กับมอเตอร์ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย หรือ ปริซึม และสัญญาณการดูดกลืนของสาร

เครื่องแบบเคลื่อนที่และความยาวคลื่นและการสแกนซ้ำ ๆ กัน (A sequential clew
scan instrument) เครื่องแบบนี้มีโปรแกรมตั้งให้ทำการวัดปริมาณที่สนใจเป็นเวลานานจน
ให้ได้สัญญาณต่อการรบกวนเฉลี่ยที่พอใจ เครื่องแบบนี้ราคาแพงเพราะ มีวงจรควบคุมอัตรา
การสแกนบริเวณที่สนใจ และสัญญาณที่ขยายสูง มีบริเวณที่มีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
เมื่อเปลี่ยนทางยาวคลื่นหรือระยะเวลาสแกน ส่วนบริเวณที่มีความเข้มเปลี่ยนแปลงเร็วจะ
รวมเข้า

แบบ spatial เครื่องแบบนี้จะมีเครื่องตรวจหาหลายอันหรือหลายช่อง จึงให้ข้อมูล
ของค่าหลายชนิดพร้อมกัน

รวมไม่กระจัด มาตรแรงแบบนี้ใช้หา โยเดียม โทเทสเซียม และ ลิเทียมจาก
แผ่นไฟได้พร้อมกัน ถึงด้อยที่ช่องเล็กยาวออก 3 ช่อง ซึ่งตรงกับความยาวคลื่น 599.0
766.5 และ 670.8 นาโนเมตร บริเวณช่องเล็กยาวออก 3 ช่อง จะมีหลอดโฟโตมัลติพลาย
เออร์ 3 อัน ทำหน้าที่วัดปริมาณแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสาม ซึ่งได้จากการคัดเลือกของฟิล
เตอร์แตรกสอด

ระบบการวัด เป็นระบบของเครื่องแบบนี้คือสแกนโพรกราฟ ฟิล์มรับแสงหรือแผ่น
รับแสงจัดไว้ตรงระบบโฟโตของตัวทำแสงเอกรงค์ ฟิล์มนี้จะทำหน้าที่รับแสงที่
ความยาวคลื่นต่างๆพร้อมกัน แต่มีข้อเสียเรื่องเวลา เพราะการทำให้ฟิล์มไวแสงและการวัด
ความเข้มแต่ละจุดเพราะบางกรณีหลายขั้นตอน เครื่องชนิดที่ใช้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์แท้
ก็จำเป็นช่องเล็กยาวออกทางกายระบบโฟโตโดยจัดไว้ ๗ ตำแหน่งสำหรับตำแหน่งของธาตุที่
สนใจ เช่น วัดความยาวคลื่นได้ 40 เส้น จะมีช่องเล็กยาวออก หลอดโฟโตมัลติพลาย
เออร์ 40 อัน ระบบทั้งหมดถูกทำให้พร้อมกัน 40 ช่อง การเปลี่ยนตำแหน่งช่องเล็กขม
และตำแหน่งหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ทำได้ยากมาก

เครื่องเขียนภาพกระจาย สเปเชียล (spatial) ใช้เครื่องตรวจหาเป็นชนิดคอนได
โวล หรือ ขบวนการชนิดอื่นที่ขึงอยู่ ๗ ระบบโฟโตของตัวทำแสงเอกรงค์ การวัดสัญญาณทำ

ได้พร้อมกันถึง 1000 ตำแหน่ง เครื่องมือระบบการกระจายหลายช่องจะถูกคุมด้วยระบบ ไมโครโพรเซสเซอร์จึงทำงานได้รวดเร็ว สัญญาต่อการรบกวนดี สภาพไวและความเที่ยง ในการวิเคราะห์ดี แต่เครื่องมือแบบนี้ราคาแพง

แบบมัลติเพล็กซ์ (multiplex) มาจากทฤษฎีสื่อสาร โดยข้อมูลหลายชุดถูกส่ง ผ่านเครื่องมือแบบช่องเดียวในเวลาเดียวกัน เครื่องมือแบบนี้ใช้หลักการฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์ม ตั้งแต่ปี 1950 นักดาราศาสตร์ศึกษาสเปกตรอินฟราเรดของดวงดาวโดยเทคนิคฟูเรียร์ เทคนิคนี้จับสัญญาณที่อ่อนจางกว่าดวงดาวและแยกสัญญาณจากการรบกวนของสิ่งแวดล้อม เครื่องมือแบบนี้จัดเป็นแบบไม่กระจาย ส่วนเครื่องแบบกระจายเป็นแบบ Hadamard transform ใช้หลักการเลื่อนตำแหน่งกันแสงที่ระนาบโฟกัสของตัวทำแสงเอกรงค์เพื่อศึกษา ข้อมูลสเปกตร

หลักการฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มที่ใช้วัดแสง Principles of Fourier Transform Optical Measurements

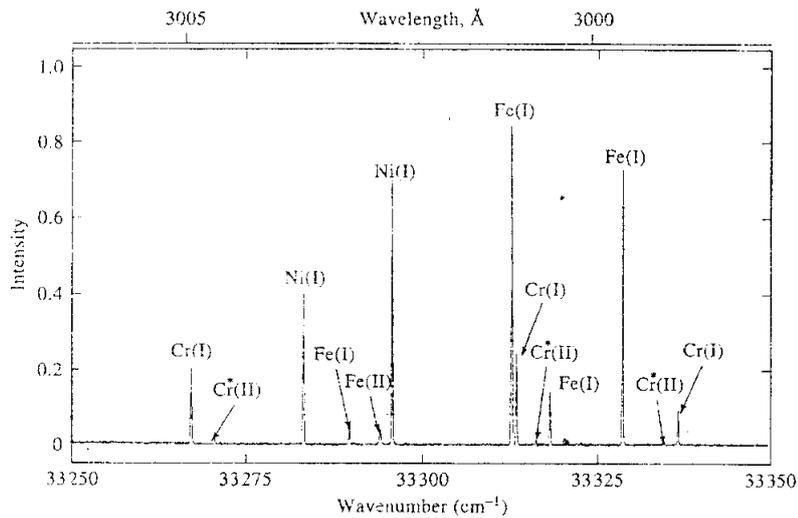
ปี ค.ศ. 1950 นักดาราศาสตร์ได้นำเทคนิคฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มศึกษาระยะทางจาก ดวงดาวกับโลกด้วยสเปกตรอินฟราเรด การวัดระยะห่างด้วยเทคนิคธรรมดาทำไม่ได้เพราะ แหล่งกำเนิดแสง (ดวงดาว) มีความเข้มน้อยและแสงจากแหล่งกำเนิดอื่นรบกวนการ วิเคราะห์ อีก 10 ปีต่อมาได้มีการนำเทคนิคฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มมาประยุกต์ใช้กับการศึกษา ทางเคมี โดยช่วงแรกยังจำกัดอยู่ในช่วงไกลอินฟราเรด ปลายปี 1960 มีการสร้างเครื่องมือ สำหรับศึกษาทางเคมีในช่วง ไกลอินฟราเรดถึงกลางอินฟราเรด (10 ถึง 400 ต่อเซนติเมตร) หลักการฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มไม่นิยมใช้กับสเปกตรอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล

ข้อดีของแทรนซ์ฟอร์มสเปกโทรเมตรี Inherent Advantages of Transform Spectrometry

ข้อดีของฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์ม

๑ ให้รังสีผ่านมาก หรือ Jaquinot เครื่องมือมีอุปสรรคทางเดินแสงน้อย ไม่มีช่อง เล็กยาวลดปริมาณแสง กำลังรังสีเข้าสู่เครื่องตรวจหามากกว่าเครื่องมือที่ใช้หลักการกระจาย (dispersive) ให้อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนสูง

๒ มีกำลังการแยกสูงและความยาวคลื่นรีโพซิทีฟ จึงวิเคราะห์สเปกตร่าซับซ้อนที่มีจำนวนเส้นสเปกตรามากและซ้อนทับกันได้ดังรูป 3- 64 เป็นสเปกตร่าแปลงจากเหล็กกล้า



รูป 3- 64 สเปกตรัมเปล่งของเหล็กได้จากเครื่องฟลูออริสเซนซ์ฟอรัมอิมิสชันสเปกโทรมิเตอร์

สเปกตรัมนี้ขยายเฉพาะช่วง 299.85 นาโนเมตร ถึง 300.75 นาโนเมตร พบเส้นสเปกตร้าของธาตุทั้งสามแยกเป็น 13 เส้น กำลังการแยกเส้นของคู่ที่อยู่ใกล้กันที่สุด ($\Delta\lambda/\lambda$) มีค่าประมาณ 6 ส่วนในล้านส่วน

๓ ทุกๆ ความยาวคลื่นของสารที่วัดเข้าสู่เครื่องตรวจหาพร้อมกัน การวิเคราะห์จึงทำได้เร็วมากเป็นวินาที หรือน้อยกว่า

สเปกตรัมที่ได้จากการวัดค่าความส่องผ่าน m ค่า ที่ช่วงความถี่หนึ่ง หรือช่วงความยาวคลื่นหนึ่งเรียก การแยกธาตุ resolution elements คุณภาพของสเปกตรัม หรือปริมาณของรายละเอียดสเปกตรัม เพิ่ม เมื่อจำนวนการแยกธาตุมีค่ามากขึ้น หรือช่วงความถี่ที่วัดสั้นลง การเพิ่มคุณภาพสเปกตรัมทำได้โดยเพิ่ม m หรือเพิ่มจำนวนการแยกธาตุโดยเพิ่มเวลาที่วัด

เช่น สเปกตรัมอินฟราเรด 500 ถึง 5000 ต่อ เซนติเมตร ต้องการการแยกธาตุเท่ากับ 3 ต่อเซนติเมตร m จะมีค่า 1500 ถ้าใช้เวลาวัด 0.5 วินาที สำหรับธาตุแต่ละตัว ดังนั้นต้องใช้ 750 วินาที ($1500 * 0.5$) หรือ 12.5 นาที เพื่อวัดสเปกตรัมทั้งช่วง ถ้าลดความกว้างการแยกธาตุเป็น 1.5 ต่อเซนติเมตร สเปกตรัมที่ได้จะชัดขึ้น (รายละเอียดดีขึ้น) จะต้องเพิ่มจำนวนของการแยกธาตุเป็นสองเท่า เวลาที่ใช้วัดต้องเพิ่มเป็นสองเท่า

การลดความกว้างของการแยกธาตุของเครื่องมือวัดแสงในช่วงอินฟราเรดจะทำให้สัญญาณต่อการรบกวนลดลง เมื่อต้องการสัญญาณต่อการรบกวนมากจะลดความกว้างช่อง

เล็กยาวลง การทำแบบนี้จะมีผลให้สัญญาณจากแหล่งกำเนิดแสงน้อย เครื่องตรวจหาวัดสัญญาณได้น้อย จึงได้สัญญาณต่อการรบกวนน้อยซึ่งไม่ดี การวัดที่ดีต้องใช้ช่องเล็กยาวแคบ ถ้ามีแสงชนเครื่องตรวจหาอินฟราเรดน้อย สัญญาณต่อการรบกวนลดลงด้วย การเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวนดีขึ้นทำได้โดยการวัดสัญญาณเฉลี่ย

การประยุกต์ใช้ค่าสัญญาณเฉลี่ยกับเครื่องสเปกโทรพื้นฐานมีข้อเสีย ราคาเครื่องแพงต้องใช้เวลาวิเคราะห์นาน เช่น การวิเคราะห์สเปกตรัมหนึ่งสเปกตรัมที่มีการแยก 1500 ต้องใช้เวลา 750 วินาที ถ้าต้องการเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวนเป็นสองเท่าจะต้องใช้สเปกตรา 4 สเปกตรา จึงต้องใช้เวลา $4 * 750$ หรือ 50 นาที

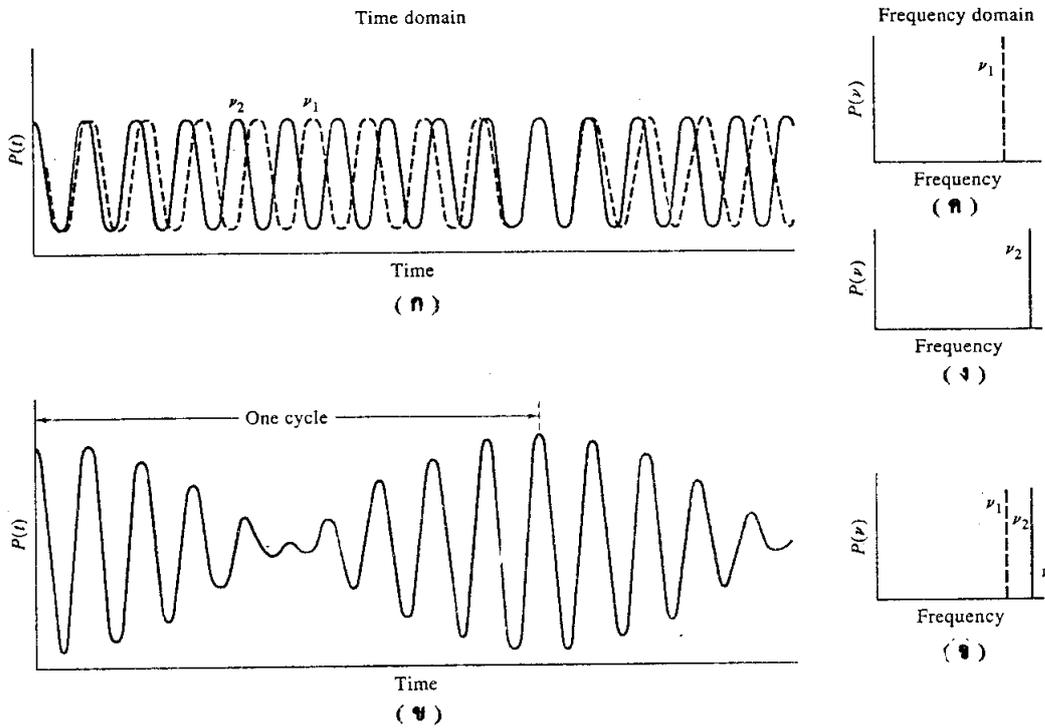
หลักการฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มต่างจากหลักการสเปกโทรพื้นฐาน แต่ละเส้นถูกวัดพร้อมกันจึงลดเวลาที่ใช้วัดน้อย เช่น วิธีธรรมดา วัด 1 เส้นใช้เวลาวัด 0.5 วินาที เมื่อต้องการวัด 1500 เส้น ต้องใช้เวลา $1500 * 0.5$ หรือ 750 วินาที นอกจากนี้ยังพบว่าเวลารวดเร็ววัดลงจากหลายนาทีเป็นวินาที ยังช่วยเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวน เช่นการสแกนสเปกตรัม 1500 เส้นใช้เวลา 750 วินาที ถ้าใช้เวลาเพียง 0.5 วินาทีตามวิธีฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์ม สัญญาณต่อการรบกวนจะดีขึ้นเป็นรากที่สองของจำนวนเส้น $(1500)^{1/2}$ เท่ากับ 39 ข้อคิดค้นนี้พบเมื่อ ปี ค.ศ. 1958 โดย P. Fellget และเรียก เฟลลเก็ตต์ หรือ มัลติเพล็กซ์ multiplex การเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวนพบกับเทคนิคฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มเท่านั้น

จากข้อคิดของวิธีมัลติเพล็กซ์ เครื่องสเปกโทรอินฟราเรดจึงใช้หลักการฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์ม แต่เทคนิคนี้ไม่เหมาะกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต วิสิเบิล และช่วงใกล้อินฟราเรด เพราะมีการรบกวนจากการรบกวนข้อผิดพลาด และฟลิกเกอร์จากแหล่งกำเนิดแสง การรบกวนข้อผิดพลาดและฟลิกเกอร์เพิ่มเมื่อกำลังสัญญาณเพิ่ม (ความเข้มแหล่งกำเนิดแสงสูง)

สเปกโทรไทมโดเมน Time domain Spectroscopy

เครื่องสเปกโทรพื้นฐานเรียกสเปกโทรแบบความถี่โดเมน (frequency domain) เครื่องสเปกโทรพื้นฐานคือเครื่องวัดกำลังแสงของสารที่สนใจเมื่อแปรความถี่ หรือ แปรความยาวคลื่น เทคนิคนี้เรียก ฟรีควอนซีโดเมนสเปกโทรสโกปี ส่วนเครื่องมือที่ใช้หลักฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มวัดกำลังแสงของสารที่สนใจเทียบกับเวลา เทคนิคนี้เรียก ไทมโดเมนสเปกโทรสโกปี

คอร์ฟูรูป 3-65 ค และ ง เป็นสเปกตราแบบฟรีควอนซีโดเมนจากแหล่งกำเนิดแสงความยาวคลื่นเดี่ยวที่ความถี่ V_1 และความถี่ V_2 เฮอร์ตซ์ คอร์ฟูรูป 3-65 จ เป็นสเปกตราจากแหล่งกำเนิดที่ให้สองความยาวคลื่น กำลังแสงที่วัดได้ที่ความถี่ที่สนใจ $P(V)$ เทียบกับความถี่ (เฮอร์ตซ์)

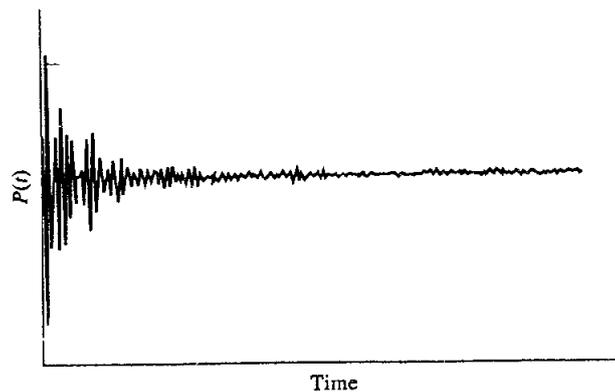


รูป 3-65 สเปกตรา (ก) การพล็อตไทม์โดเมน (ก) และ (ข) การพล็อตฟรีควอนซีโดเมน (ค) (ง) และ (จ)

คอร์ฟู 3-65 ก เป็นสเปกตราแบบไทม์โดเมนของแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นเดี่ยวโดยเส้นที่บวคที่ความถี่ V_2 เส้นประที่ความถี่ V_1 กำลังแสงที่วัดได้ ณ เวลาที่สนใจ $P(t)$ เทียบกับเวลา (วินาที) จากรูปเห็นเส้นสองเส้น (แสงเดินทางด้วยความถี่ต่างกัน) ทำให้เกิดการแทรกสอดโดยจุดที่เฟสตรงกัน กำลังแสงจะเพิ่มขึ้น จุดที่เฟสตรงข้ามกันกำลังจะลดลงเป็นศูนย์ คอร์ฟู 3-65 ข สเปกตรัมไทม์โดเมนของสารที่สนใจดูคลื่นแสงที่สองความถี่ ที่หัวลูกศรในแนวราบแทนคลื่นอยู่ในแนวเดียวกัน (in phase) จะเกิด

การแทรกสอดสมบูรณ์ในหนึ่งจังหวะ หรือ บิต จุดทั้งสองมีความเข้มสูงสุด บริเวณกึ่งกลางลูกศรทั้งสองคลื่นทั้งสองมีเฟสตรงข้ามกัน (out of phase) จะเกิดการหักล้างกัน จุดนี้มีความเข้มต่ำสุด

รูป 3-66 สัญญาณโทมโคโนเมนของสารที่สนใจจากแหล่งกำเนิดแสงหลายความยาวคลื่น สเปกตรากจะซับซ้อนกว่ารูป 3-65 เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงมีจำนวนความยาวคลื่นมาก การแทรกสอดแบบสมบูรณ์ในหนึ่งจังหวะ (เต็มจังหวะ) จึงไม่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ทำการวัด จากรูปจะเห็นบิตหลายบิต โดยบิตเหล่านี้แทนความยาวคลื่นที่อยู่ในเฟสเดียวกัน และตรงข้ามกัน ความเข้มสัญญาณที่วัดได้จะลดลงเรื่อยเนื่องจากคลื่นจะจัดตัวแบบเฟสตรงข้ามมากขึ้น



รูป 3-66 สัญญาณโทมโคโนเมนจากแหล่งกำเนิดหลายความยาวคลื่น

สัญญาณโทมโคโนเมนให้ข้อมูลเช่นเดียวกับสัญญาณฟรีควอนซีโดเมน การเปลี่ยนสัญญาณจากรูปแบบหนึ่ง (ความถี่) ไปอีกรูปแบบหนึ่ง (เวลา) โดยใช้เครื่องคำนวณตัวเลข เช่น รูป 3-65 ข ได้จากรูป 3-65 จ โดยใช้สมการ

$$P(t) = k \cos(2\pi V_1 t) + k \cos(2\pi V_2 t) \quad 3-23$$

k ค่าคงที่ t เวลา ผลต่างความถี่ระหว่างเส้นสองเส้นมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของ V_2 การเปลี่ยนสัญญาณกลับไปกลับมาระหว่างความถี่และเวลาก่อนข้างซับซ้อน จึงต้องใช้เครื่องสมองกลชนิดความเร็วสูงมากช่วย

สเปกตร้าไทม์โดเมนที่ได้จากมาตรแทรกสอดไมเคิลสัน Obtaining Time Domain Spectra with a Michelson Interferometer

การวัดสัญญาณไทม์โดเมนทำได้โดยการเปลี่ยนสัญญาณความถี่สูงเป็นสัญญาณความถี่ที่วัดได้ (มอดูเลต หรือ ความถี่ต่ำ) โดยไม่มีผลต่อเวลาที่วัด สัญญาณความถี่ที่ถูกมอดูเลตแปรโดยตรงกับสัญญาณความถี่เดิม (สูง) การศึกษาสเปกตรัมของสารที่สนใจในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (หลายความยาวคลื่น) จะต้องใช้วิธีการมอดูเลตที่เหมาะสม มาตรแทรกสอดไมเคิลสันนิยมใช้วิธีการมอดูเลตช่วงความยาวคลื่นที่สนใจ

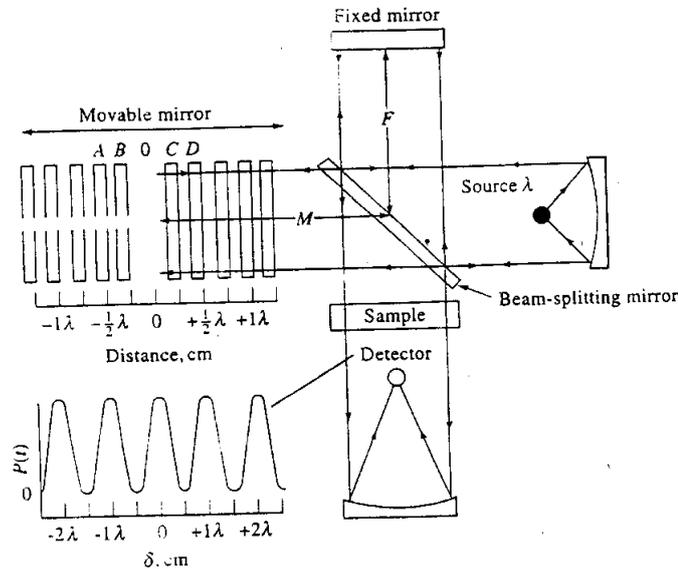
อุปกรณ์ที่ใช้มอดูเลตรังสีใช้หลักการแทรกสอด ไมเคิลสันอธิบายหลักการนี้ปลายศตวรรษที่ 19 มาตรแทรกสอดไมเคิลสันเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นสองลำที่มีความเข้มเกือบเท่ากัน โดยลำทั้งสองมีทางเดินแสงต่างกัน จากนั้นวัดความเข้มแสงของลำแสงทั้งสองที่มีทางเดินแสงต่างกัน โดยบริเวณที่อยู่ในเฟสเดียวกันจะมีความเข้มสูงสุด บริเวณที่เฟสตรงข้ามกันจะมีความเข้มต่ำสุด

รูป 3-67 ลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านเข้าสู่กระจกเงาโค้ง แสงที่ออกมาเป็นแสงในแนวขนาน แล้วผ่านเข้าสู่ตัวแยกแสง ลำแสงที่หนึ่งถูกสะท้อนจากกระจกเงาแนวตั้งที่มีระยะห่างแน่นอน ลำแสงที่สองถูกสะท้อนโดยกระจกเงาในแนวราบที่เคลื่อนที่ได้ ลำแสงทั้งสองจะถูกรวมอีกครั้งที่ตัวรวมแสง ดังนั้นลำแสงเพียงครึ่งหนึ่งของลำแสงทั้งสองเข้าสู่สารตัวอย่างและเครื่องตรวจหา ส่วนลำแสงอีกครึ่งหนึ่งของลำแสงทั้งสองเข้าสู่แหล่งกำเนิดแสง ลำแสงที่ผ่านสารตัวอย่างและเครื่องตรวจหาคือลำแสงที่ใช้วิเคราะห์

กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ในแนวราบเคลื่อนที่ได้ด้วยอัตราเร็วคงที่มีผลให้ลำแสงที่เข้าสู่สารตัวอย่างและเครื่องตรวจหาไม่สัมพันธ์กัน ถ้าระยะห่างของกระจกเงาทั้งสองเท่ากัน (ตำแหน่ง 0) รังสีทั้งสองจะอยู่ในเฟสเดียวกัน จึงมีความเข้มสูงสุด ถ้าแสงเดินทางต่างกัน $1/4 \lambda$ (ทางบวกและทางลบ) ตำแหน่ง B และ C รังสีทั้งสองจะอยู่คนละเฟส จึงมีความเข้มต่ำสุด (เป็น 0) ถ้าแสงเดินทางต่างกัน $1/2 \lambda$ (ทางบวกและทางลบ) ตำแหน่ง A และ D รังสีทั้งสองจะอยู่ในเฟสเดียวกัน จึงมีความเข้มสูงสุด

ผลต่างของทางเดินแสงของสองลำแสงมีค่า $2 (M - F)$ คือความหน่วง (retardation) แทนด้วย δ การพล็อตสัญญาณจากเครื่องตรวจหาเทียบกับ δ เรียก อินเทอร์ฟีรोगราม ถ้าแหล่งกำเนิดแสงมีความยาวคลื่นเดียว อินเทอร์ฟีรोगรามจะเป็นเคอร์ฟโคไซน์ ดังรูปข้างล่าง เมื่อ $\delta = 0$ หรือทางเดินแสงเท่ากัน ความเข้มแสงจะมีค่าสูงสุด

แสงชนเครื่องตรวจหาหลังจากผ่านมาตรแทรกสอดไมเคิลสันจะมีความถี่ต่ำกว่าความถี่แหล่งกำเนิดแสง ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ทั้งสองค่าเขียน $P(t)$ เทียบกับความหน่วง δ ดังรูป 3-64 สัญญาณที่เกิดขึ้นในหนึ่งจังหวะเมื่อกระจกเงาเคลื่อนด้วยมอเตอร์ให้ระยะทางเป็นครึ่งความยาวคลื่น ถ้ากระจกเงาเคลื่อนด้วยความเร็วคงที่ v_m เซนติเมตรต่อวินาที กำหนดให้ τ คือเวลาที่ใช้เพื่อให้กระจกเงาเลื่อนไป $\lambda/2$ เซนติเมตรเขียนเป็นสมการได้



รูป 3- 67 แผนภูมิทางเดินแสงของมาตรแทรกสอดไมเคิลสันจากแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว

$$v_m \cdot \tau = \lambda/2 \quad 3-24$$

ความถี่ f ของสัญญาณที่เครื่องตรวจหาวัดได้เขียนเป็นส่วนกลับของ τ หรือ

$$f = 1/\tau = v_m / \lambda/2 = 2 v_m / \lambda \quad 3-25$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับเลขคลื่น \bar{v} เขียนเป็น

$$f = 2 v_m \bar{v} \quad 3-26$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงแสงของลำแสงและความถี่ของอินเทอร์ฟีรोगรามได้จากการแทน $\lambda = c/v$ ลงในสมการ 3-25

$$f = 2 V_m V / C \quad 3-27$$

V ความถี่ของลำแสง ความเร็วแสง 3×10^{10} เซนติเมตรต่อวินาที V_m ค่าคงที่ของอินเทอร์เฟอแกรม f แปรโดยตรงกับความถี่เชิงแสง V ค่าสัดส่วนคงที่มีค่าน้อย ตัวอย่าง ถ้ากระเจาเจาเคลื่อนด้วยความเร็ว 1.5 เซนติเมตรต่อวินาที

$$\text{จาก } f = 2 V_m V / C$$

จากนิยาม

$$\begin{aligned} f/V &= 2 V_m / C \\ &= 2 * 1.5 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} / 3 * 10^{10} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} \\ f &= 10^{-10} V \end{aligned}$$

จากตัวอย่างนี้เห็นว่าความถี่แสงวิสิเบิลและอินฟราเรดถูกมอดูเลตในช่วงเสียงด้วยมาตรแทรกสอดไม่เกิดสัน

ตัวอย่าง จงคำนวณช่วงความถี่ของสัญญาณมอดูเลตจากมาตรแทรกสอดไม่เกิดสัน ด้วยกระเจาความเร็ว 0.20 เซนติเมตรต่อวินาที รังสีวิสิเบิล 700 นาโนเมตร รังสีอินฟราเรด 16 ไมโครเมตร (4.3×10^{14} ถึง 1.9×10^{13} เฮิร์ตซ์)

ในช่วงวิสิเบิล

$$\begin{aligned} f &= 2 V_m / \lambda \\ &= 2 * 0.20 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} / 700 * 10^{-7} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} \\ &= 5714 \text{ เฮิร์ตซ์} \end{aligned}$$

ในช่วงอินฟราเรด

$$\begin{aligned} &= 2 * 0.20 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} / 16 * 10^{-4} \text{ เซนติเมตรต่อวินาที} \\ &= 250 \text{ เฮิร์ตซ์} \end{aligned}$$

เครื่องตรวจหาที่ใช้วัดกำลังสัญญาณในช่วงวิสิเบิลและอินฟราเรดมักใช้ช่วงความถี่เสียง รูป 3-68 เป็นอินเทอร์เฟอแกรมไทม์โคเมนทางด้านซ้าย ทางขวาเป็นสเปกตราฟรีควอนซีโคเมน

ฟูเรียร์แทรนซ์ฟอร์มอินเทอร์เฟอแกรม Fourier Transformation of Interferogram

คลื่นโคไซน์ของอินเทอร์เฟอแกรมที่แสดงในรูป 3-68 และในรูป 3-67 เขียนเป็นสมการได้

$$P(\delta) = 1/2 P(\bar{V}) \cos 2\pi f t \quad 3-28$$

$P(\bar{V})$ กำลังแสงของลำแสงที่ชนมาตรแทรกสอด $P(\delta)$ แอมพลิจูด หรือ กำลังของสัญญาณอินเทอร์ฟิรแกรม มาตรแทรกสอดแบ่งลำแสงเป็นสองส่วน ลำแสงทั้งสองมักมีความเข้มไม่เท่ากัน การทำงานของเครื่องตรวจหาและเครื่องขยายมักขึ้นกับความถี่ เพื่อให้มาตรแทรกสอดทำงานถูกต้องจะต้องใช้ตัวแปรใหม่ $B(\bar{V})$ แทน $P(\bar{V})$ สมการนี้เขียนเป็น

$$P(\delta) = B(\bar{V}) \cos 2\pi f t \quad 3-29$$

แทนสมการ 3-26 ในสมการ 3-28

$$P(\delta) = B(\bar{V}) \cos 4\pi V_m \bar{V} t \quad 3-30$$

เมื่อแทนความเร็วกระจกเงาคด้วยเทอมความหน่วง δ

$$V_m = \delta / 2 * t$$

แทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการ 3-30 ได้

$$P(\delta) = B(\bar{V}) \cos 2\pi \delta \bar{V}$$

ค่านี้แทนขนาดของสัญญาณอินเทอร์ฟิรแกรมเป็นฟังก์ชันกับแฟคเตอร์ความหน่วง และเลขคลื่นของสัญญาณแสงที่เข้า

อินเทอร์ฟิรแกรมที่แทนในรูป 3-68 ข เขียนแทนด้วยสองเทอม แต่ละเทอมแทนแต่ละเลขคลื่น

$$P(\delta) = B_1(\bar{V}) \cos 2\pi \delta \bar{V}_1 + B_2(\bar{V}) \cos 2\pi \delta \bar{V}_2 \quad 3-31$$

เมื่อใช้แหล่งกำเนิดแสงต่อเนื่อง ดังรูป 3-68 ก อินเทอร์ฟิรแกรมแทนด้วยผลรวมของเทอมโคไซน์ซึ่งมีมากมาย

$$P(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\bar{V}) \cos 2\pi \bar{V} \delta d\bar{V} \quad 3-32$$

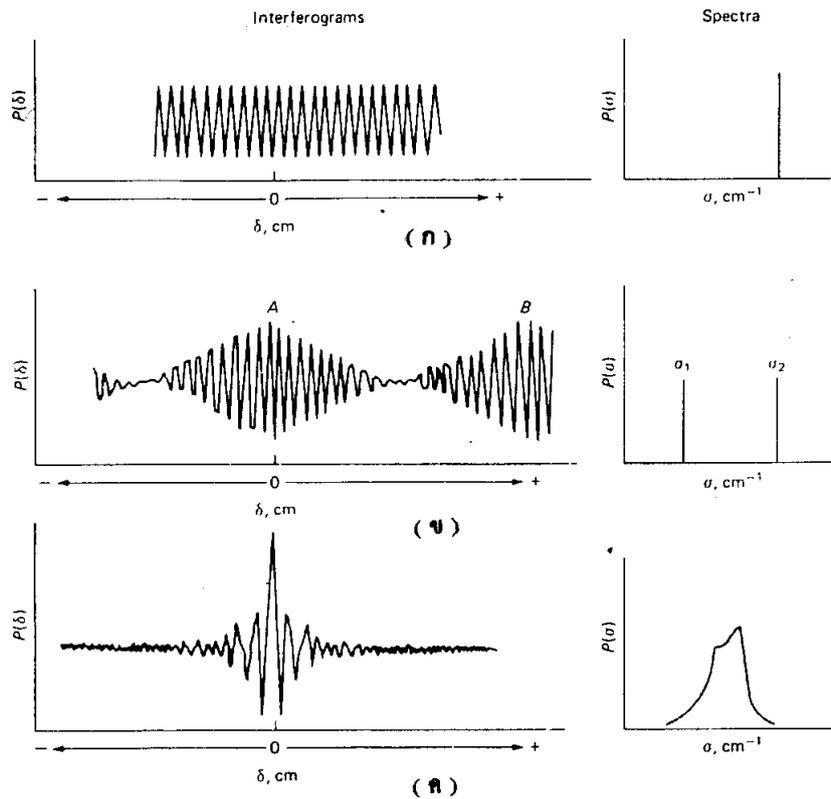
ฟูรีเยร์แทรนซฟอร์มของการอินทิเกรตสมการนี้คือ

$$B(\bar{V}) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\delta) \cos 2\pi \bar{V} \delta d\delta \quad 3-33$$

ฟูรีเยร์สเปกโทรสโคปีเชิงแสงเป็นการบันทึก $P(\delta)$ เทียบกับ δ ดังสมการ 3-32 แล้วใช้หลักคณิตศาสตร์แปลงความสัมพันธ์นี้จะได้ $B(\bar{V})$ เทียบกับ \bar{V} ได้สเปกตรัมความถี่ดังสมการ 3-28

สมการ 3-32 และสมการ 3-33 ไม่สามารถใช้ได้ดังที่เขียน เพราะเลขคลื่นของลำแสงไม่ได้เกิดจาก 0 และจบที่ ∞ ความยาวทางเดินแสงของกระจกเงาไม่ถึง ∞ (ปกติใช้

แค่สองถึงสามเซนติเมตร) เทคนิคฟูรีเยร์แทรนซ์ฟอร์มกับเครื่องส่องกลต้องใช้เครื่อง
 ตรวจหาที่ให้สัญญาณแบบตัวเลข (ดิจิต) สัญญาณที่ออกมาแต่ละจังหวะ (คาบ) ต้องเก็บ
 เป็นตัวเลข สมการ 3-33 ช่วงวัดสารตัวอย่าง d δ ต้องมีค่าน้อยมากๆ (d δ เข้าใกล้ 0)
 สิ่ง que แสดงมานี้คือขีดจำกัดการแยกของเครื่องฟูรีเยร์แทรนซ์ฟอร์มที่ใช้งานกับความถี่



รูป 3-68 การเปรียบเทียบอินเทอร์เฟอแกรมและสเปกตราเชิงแสง

การแยก Resolution

การแยกของเครื่องสเปกโทรฟูรีเยร์แทรนซ์ฟอร์มระหว่างเส้นสองเส้นซึ่งมีค่าเลข
 คลื่นต่างกันเขียนเป็น

$$\Delta \bar{\nu} = \bar{\nu}_1 - \bar{\nu}_2$$

3-34

\bar{V}_1 และ \bar{V}_2 เป็นเลขคลื่นของเส้นที่ 1 และเส้นที่ 2

การแยกเส้นสองเส้น สัญญาณโทมโคเมนต้องสมแกนนานพอเพื่อให้สัญญาณความเข้มสูงสุดสองครั้ง หรือ การแทรกสอดสมบูรณ์หนึ่งจังหวะ หรือ บิต เช่น การแยกเส้นสองเส้นโดยเส้นหนึ่งอยู่ที่เลขคลื่น \bar{V}_1 เส้นสองอยู่ที่เลขคลื่น \bar{V}_2 ดังรูป 3-68 ข อินเทอร์ฟิรแกรมจากจุดยอด A ความเข้มสูงสุดที่ความหน่วง เป็น 0 จนถึงจุดยอด B ซึ่งคลื่นอยู่ในเฟสเดียวกันอีกครั้ง (ความเข้มสูงสุด) จุด B จะเกิดเมื่อ $\delta \bar{V}_2$ มากกว่า $\delta \bar{V}_1$ เท่ากับ 1

$$\begin{aligned} \delta \bar{V}_2 - \delta \bar{V}_1 &= 1 \\ \bar{V}_2 - \bar{V}_1 &= 1 / \delta \end{aligned}$$

แทนค่านี้ในสมการ 3-34 การแยกเขียนได้เป็น

$$\Delta \bar{V} = \bar{V}_2 - \bar{V}_1 \quad 3-35$$

การแยก (ผลต่างของเลขคลื่น) จะดีขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างสองลำแสงมีค่ามากขึ้น (กระจกเงาเคลื่อนที่มาก)

ตัวอย่าง จงหาระยะทางที่มอเตอร์ขับเคลื่อนกระจกเพื่อให้เกิดการแยก 0.1 ต่อเซนติเมตร

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V} &= 1 / \delta \\ 0.1 \text{ ต่อเซนติเมตร} &= 1 / \delta \\ \delta &= 10 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ระยะทางที่ให้กระจกเงาเคลื่อนที่มีค่าครึ่งหนึ่งของความหน่วงเท่ากับ 5 เซนติเมตร

สัญญาณและการรบกวน Signal and Noise

การวัดทางเคมีมีองค์ประกอบสองชนิด ชนิดที่หนึ่งได้แก่ สัญญาณ สัญญาณเป็นข้อมูลของสารที่สนใจ ชนิดที่สอง การรบกวน การรบกวนให้ข้อมูลที่ไม่ต้องการ โดยข้อมูลนี้มีผลต่อสัญญาณที่วิเคราะห์ การรบกวนเกิดกับสารที่วิเคราะห์ที่มีปริมาณน้อย การรบกวนมีผลให้การวัดไม่แม่นยำ (accuracy) และไม่เที่ยง (precision)

อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน The Signal to Noise Ratio

ผลของการรบกวนที่มีต่อการวัดสัญญาณแสดงในรูป 3-69 ก เครื่องบันทึกสัญญาณกระแสขนาด 10^{-5} แอมแปร์บนกระดาษกราฟ แสดงการรบกวนด้วย รูป 3 69 ข เครื่องบันทึกสัญญาณขนาดเท่าเดิมแต่ไม่มีการรบกวน เครื่องวัดสัญญาณมีการรบกวนจาก

เทอร์โมไดนามิกส์และความร้อน (อุณหภูมิ) ปรากฏการณ์ทั้งสองไม่สามารถกำจัดให้เป็นศูนย์ได้

การวัดสัญญาณส่วนมากมีความแรงเฉลี่ยของสัญญาณการรบกวน N คงที่ N ไม่ขึ้นกับขนาดของสัญญาณ S ผลของการรบกวนที่มีต่อความผิดพลาดสัมพัทธ์ในการวัดสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัญญาณที่วัดมีค่าลดลง (สารที่สนใจมีความเข้มข้นน้อย) วิเคราะห์ หรือความสามารถของเครื่องที่ใช้วัดสัญญาณจากอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน อัตราส่วนนี้มีค่ามากยิ่งดี

สัญญาณกระแสตรงในรูป 3-69 ก ขนาดของการรบกวนมักใช้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นตัวอธิบายโดยทำการวัดความแรงสัญญาณหลายๆ ครั้ง สัญญาณที่วัดได้กำหนดเป็นสัญญาณเฉลี่ย อัตราส่วน S/N เขียนได้เป็น

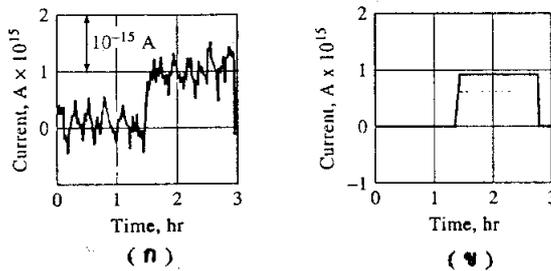
$$S/N = \text{ค่าเฉลี่ย} / \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน} = \bar{X} / S \quad 3-36$$

อัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวน S / N เป็นส่วนกลับกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน RSD

$$S/N = 1 / RSD \quad 3-37$$

สัญญาณที่บันทึกได้ในรูป 3-69 ก ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 โดยใช้ค่าสัญญาณสูงสุด - ค่าสัญญาณต่ำสุดและหารด้วย 5

เครื่องไม่สามารถวัดสัญญาณได้เมื่อ S/N น้อยกว่า 2 หรือ 3 รูป 3-70 เป็นคอร์ฟสนับสนุนเหตุผลนี้ รูปบนสเปกตรัมนิวเคลียร์แมกนีติกเรโซแนนซ์ของโปรเจสเทอโรน S/N ประมาณ 4.3 รูปล่างสเปกตรัมของสารเคมี S/N ประมาณ 43 พิกสำคัญปรากฏชัดเจนส่วนที่ค่อยๆ (ไม่ค่อยสำคัญ) มีค่าพอๆ กับการรบกวน



รูป 3-69 ผลของการรบกวนที่มีต่อกระแสที่วัดได้ (ก) กระแสตรง 10^{-15} แอมแปร์ที่ได้จากเครื่องบันทึก (ข) ค่าเฉลี่ยของกระแสที่ได้จากเครื่องบันทึก

แหล่งกำเนิดการรบกวนในเครื่องมือวิเคราะห์ Sources of Noise in Instrumental Analysis

การรบกวนทางเคมี Chemical Noise

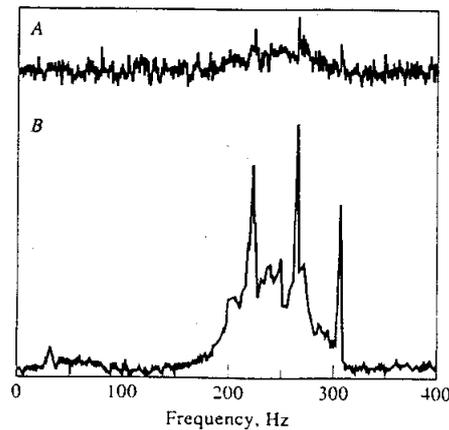
การรบกวนทางเคมีเกิดจากตัวแปรที่คุมไม่ได้และมีผลต่อระบบที่ต้องการวิเคราะห์ เช่น ตำแหน่งสมดุลเคมีที่วัดขึ้นกับอุณหภูมิ หรือ ความดัน ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อปริมาณความชื้นในสารตัวอย่าง การสันตะเทียนมีผลต่อโครงสร้างผลึก ความเข้มแสงเปลี่ยนมีผลต่อวัสดุไวแสง ควันทันในห้องปฏิบัติการอาจทำปฏิกิริยากับสารที่วิเคราะห์

การรบกวนเครื่อง Instrumental Noise

การรบกวนขึ้นกับแต่ละองค์ประกอบเครื่อง แหล่งกำเนิด สัญญาณเข้าเครื่องตรวจหา การรบกวนที่เกิดจากแหล่งต่างๆมีหลายแบบ การรบกวนจากแหล่งต่างๆ ค่อนข้างซับซ้อน ไม่สามารถบอกรายละเอียดได้ครบถ้วน การรบกวนที่เกิดกับเครื่องมือมี 4 แบบ

- 1 การรบกวน อุณหภูมิ (thermal) หรือ จอนห์สัน (Johnson)
- 2 การรบกวน ช็อต (shot)
- 3 การรบกวน ฟลิกเกอร์ (flicker)
- 4 การรบกวน สิ่งแวดล้อม (environmental)

การรบกวนอุณหภูมิ หรือ ความร้อน ความร้อนเกิดจากอิเล็กทรอนิกส์หรือ ประจุอื่นๆ ที่ผ่านความต้านทาน ตัวเก็บประจุ เครื่องตรวจหารังสี เซลล์ไฟฟ้าเคมี และความต้านทานแบบอื่นๆ ที่อยู่ในเครื่องสเปกโทร การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุเป็นแบบสุ่มทำให้



รูป 3-70 ผลของอัตราส่วนสัญญาณต่อการรบกวนของสเปกตรานิวเคลียร์เมกนีตริกเรโซแนนซ์

ประจุนับตัวนำไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (มีสมบัติต่างกัน) ประจุที่มีสมบัติต่างกันทำให้ศักย์ไม่คงที่ (เปลี่ยนไป) ศักย์ที่เปลี่ยนไปทำให้ค่าที่อ่านได้ไม่แม่นยำ การรบกวนแบบนี้เกิดขึ้นแม้จะไม่มีกระแสผ่านความต้านทาน ขนาดของการรบกวนอุณหภูมิที่ได้จากการพิจารณาทงอุณหภูมิศาสตร์เขียนเป็นสมการได้

$$V_{rms} = (4kTR\Delta f)^{1/2} \quad 3-38$$

V_{rms} รากกำลังสองเฉลี่ยของการรบกวนของศักย์ที่อยู่ในช่วงความถี่ที่มีแถบกว้าง Δf เฮิร์ตซ์ k ค่าคงที่โบลซ์มันน์ $1.38 * 10^{-23}$ จูลต่อองศาเคลวิน T อุณหภูมิเป็นเคลวิน R ความต้านทานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นโอห์ม

การรบกวนอุณหภูมิขึ้นกับแถบความกว้างของความถี่ไม่ขึ้นกับความถี่ การรบกวนแบบนี้อาจเรียกการรบกวนไวท์ (white noise) การรบกวนนี้เกิดในช่วงรังสีวิทยุ การรบกวนแบบนี้ไม่ขึ้นกับสมบัติทางกายภาพของความต้านทาน

การรบกวนการรบกวนอุณหภูมิทำโดยใช้ความถี่แคบๆ แต่การใช้แถบความถี่แคบๆ เครื่องมือจะตอบสนองการเปลี่ยนสัญญาณเข้าจึงต้องใช้เวลาในการวัดยาวขึ้น

จากสมการ 3-38 การลดการรบกวนทำโดยลดความต้านทานไฟฟ้าในวงจรเครื่องมือหรือลดอุณหภูมิภายในองค์ประกอบของเครื่องมือ เช่นลดอุณหภูมิของขบวนการโฟโตไดโอดที่ใช้วัดช่วงอัลตราไวโอเล็ต- วิสิเบิล ปกติการทำงานของขบวนการโฟโตไดโอดทำงานที่ 25 องศาเซลเซียส ถ้าให้เครื่องตรวจหาทำงานที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน การรบกวนอุณหภูมิลดลงครึ่งหนึ่ง

โดย $\Delta f = 1/3 t_r$ 3-39

เวลาที่ให้เครื่องวัด (rise time) คือเวลาตอบสนองเป็นวินาทีจากสัญญาณเข้าเปลี่ยนเป็นสัญญาณออก ถ้าสัญญาณเข้ามีค่าร้อยละ 10 สัญญาณออกมีค่าร้อยละ 90

ตัวอย่าง จงหาผลของแถบความถี่ที่มีต่อการรบกวนอุณหภูมิเมื่อลดเวลาตอบสนองของเครื่องจาก 1 วินาที เป็น 1 ไมโครวินาที

ถ้าสมมติว่า เวลาตอบสนองมีค่าพอๆ กับเวลาที่ใช้

$$\Delta f = 1/3 t_r$$

วัดนาน 1 วินาที

$$\Delta f = 1/3 * 1 = 1/3$$

วัดนาน 1 ไมโครวินาที

$$\Delta f = 1/3 \cdot 10^{-6} = 10^{-6}/3$$

การลดเวลาวัดลงมีผลให้ Δf เปลี่ยนจาก 1 เฮิร์ตซ์ เป็น 10^{-6} เฮิร์ตซ์

จากสมการ $V_{rms} = (4kTR\Delta f)^{1/2}$ การรบกวนอุณหภูมิมีค่าเท่ากับ $(10^{-6})^{1/2}$ หรือ 1000 เท่า

การรบกวนช็อต Shot Noise

การรบกวนช็อตเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน หรือ ประจุอื่นผ่านรอยต่อในวงจรรวม อิเล็กทรอนิกส์ รอยต่อระหว่างหน้า p และ n ของโฟโตเซลล์และหลอดสูญญากาศ รอยต่อนี้อยู่ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดที่เอาอากาศออก กระแสที่วัดได้มีระดับพลังงานแน่นอน กระแสนี้เกิดจากการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่าหนึ่งไปอีกค่าหนึ่ง การรบกวนนี้เขียนเป็นสมการได้

$$i_{rms} = (2 I e \Delta f)^{1/2} \quad 3-40$$

i_{rms} รากกำลังสองเฉลี่ยของกระแสที่แกว่ง ค่านี้ขึ้นกับ กระแสตรง I e ประจุบนอิเล็กตรอน $1.60 \cdot 10^{-19}$ คูลอมบ์ Δf แถบความกว้างความถี่ที่สนใจ การรบกวนนี้จัดเป็นการรบกวนไวท์ การลดการรบกวนทำได้โดยการลดแถบความกว้างความถี่

การรบกวนฟลิคเกอร์ Flicker Noise

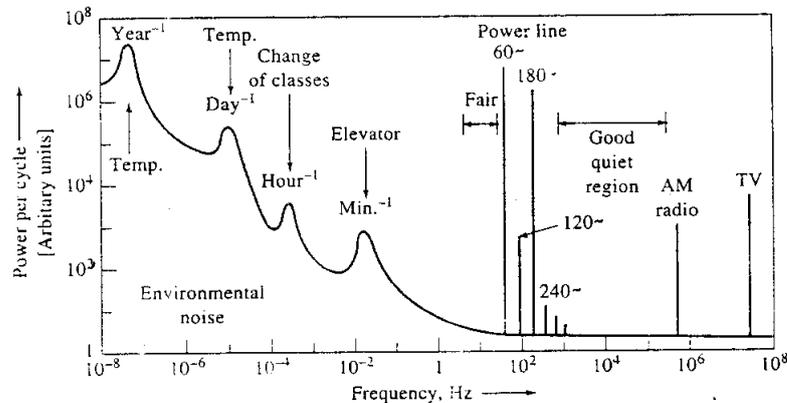
ขนาดการรบกวนฟลิคเกอร์แปรผกผันกับความถี่ของสัญญาณที่วัด เขียนเป็น $1/f$ การรบกวนฟลิคเกอร์ยังไม่เป็นที่เข้าใจ ในส่วนของเครื่องขึ้นกันตำแหน่งเซลล์และความเข้มแหล่งกำเนิดแสงไม่คงที่ ซึ่งแก้ไขโดยใช้แหล่งจลหาค่าคงไฟฟ้าคงที่ การรบกวนนี้ขึ้นกับความถี่ การรบกวนนี้มีผลมากในช่วงความถี่ต่ำกว่า 100 เฮิร์ตซ์ การใช้เครื่องวัดที่มีองค์ประกอบ เครื่องขยายกระแสตรง มาตรวัด และเข็มแกลเวนอมิเตอร์ วัดเป็นเวลานานจะเกิดการรบกวนฟลิคเกอร์ การลดการรบกวนฟลิคเกอร์จะใช้ขดลวด หรือ แผ่นฟิล์มโลหะหุ้มรอบๆ รีซิสเตอร์ ไม่ใช้รีซิสเตอร์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

การรบกวนสิ่งแวดล้อม Environmental Noise

การรบกวนสิ่งแวดล้อมเกิดจากตัวนำ (conductor) ในเครื่องเก็บ หรือ รับสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพลดลง จึงเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าน้อยลง แหล่งกำเนิดการรบกวนสิ่งแวดล้อมจากรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ สถานีส่งคลื่นวิทยุ สถานีส่งคลื่นโทร

ทัศน สถานีย่อยกระแสไฟฟ้า ระบบเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมัน การอาร์กที่สวิตช์ แปร่งถ่านในมอเตอร์ไฟฟ้า ฟิวส์ การรบกวนจากชั้นบรรยากาศ การรบกวนแบบแถบ ความกว้างความถี่แคบเกิดกับ สถานีจ่ายไฟฟ้า และสถานีส่งคลื่นวิทยุ

รูป 3-71 สเปกตรัมการรบกวนจากแหล่งกำเนิดการรบกวนมีค่ามากและเกิดอย่างต่อเนื่องในช่วงความถี่ต่ำ การรบกวนนี้จัดเป็นการรบกวนฟลิคเกอร์ ซึ่งไม่รู้แหล่งกำเนิดการรบกวน ช่วงความถี่ 3 เฮิรตซ์ ถึง 60 เฮิรตซ์ และ 1 กิโลเฮิรตซ์ ไม่ค่อยมีการรบกวน



รูป 3-71 แหล่งกำเนิดการรบกวนเนื่องจากสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ แหล่งกำเนิดขึ้น กับช่วงความถี่

การเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวน Signal to Noise Enhancement

การเพิ่มสัญญาณต่อการรบกวนของเครื่องมือมีสองวิธี ฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ การรบกวนจากฮาร์ดแวร์ (เครื่องมือ) เช่น ฟิวเตอร์ ซอฟเพอร์ ที่กำบัง (shields) มอดูเลเตอร์ เครื่องตรวจหาแบบได้จังหวะ (synchronous detectors) อุปกรณ์เหล่านี้ทำหน้าที่ กำจัด หรือ ลดการรบกวนโดยไม่มีผลต่อสัญญาณวิเคราะห์ ส่วนซอฟต์แวร์ ทำหน้าที่สกัด สัญญาณจากข้อมูลการรบกวน การใช้ซอฟต์แวร์คุมฮาร์ดแวร์ของเครื่องช่วยลดการรบกวน ได้มาก

อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ลดการรบกวน Hardware Devices for Noise Reduction

๑ การใช้สายดิน (grounding) และการกำบัง (shielding) ช่วยลดปัญหาจาก อุปกรณ์คู่คลื่นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวสำคัญของการรบกวน

๒ การใช้ดิฟเฟอเรนซ์แอมพลิฟาย (difference amplifier) และออฟแอม (op amp) ช่วยลดการรบกวนในวงจรเครื่องตรวจหา

๓ ใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณ (analog filter) เพื่อขจัดการรบกวน

๔ ใช้หลักการมอดูเลต (modulate) ลดการรบกวน โดยเปลี่ยนสัญญาณความถี่ต่ำ หรือ สัญญาณกระแสตรงเป็นความถี่สูง และขยายสัญญาณนี้ แล้วดีมอดูเลตเปลี่ยนเป็น สัญญาณความถี่ต่ำ ขณะเปลี่ยนความถี่จะใช้วงจรกรอง (ฟิเตอร์) ที่เหมาะสม

๕ ใช้หลักการสับสัญญาณ (signal chopping) และขยายสัญญาณที่สับ (chopper Amplifier) โดยใช้อุปกรณ์สับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเป็นจังหวะ (โดยมีความเข้มต่ำสุด และสูงสุด) เครื่องตรวจหาแบบได้จังหวะจะทำหน้าที่วัดเฉพาะสัญญาณที่ถูกสับ และเครื่องขยายจะขยายสัญญาณนี้ สัญญาณรบกวนเป็นแบบต่อเนื่อง

๖ ใช้เครื่องแบบขยายแบบแอนาล็อก (lock in amplifier) เทคนิคนี้ใช้สัญญาณจากสองแหล่งกำเนิดมาเทียบกัน โดยแหล่งที่หนึ่งเป็นสัญญาณที่วิเคราะห์ แหล่งที่สองเป็น สัญญาณอ้างอิง สัญญาณทั้งสองต้องมีความถี่และเฟสตรงกัน เฉพาะสัญญาณที่วิเคราะห์มีความถี่และเฟสตรงกับสัญญาณอ้างอิงเท่านั้นที่ถูกวัด สัญญาณอื่น (สัญญาณรบกวน) ไม่ถูกวัด

แบบฝึกหัด

3-1. ทำไมความกว้างช่องเล็กยาวของตัวทำแสงเอกรงค์ปริซึมต้องเปลี่ยนไปเพื่อให้แถบความกว้างยังผลมีค่าคงที่ ขณะที่ความกว้างช่องเล็กยาวของตัวทำแสงเอกรงค์เกรตติงไม่ต้องเปลี่ยน

3-2. ทำไมจึงต้องใช้ความกว้างช่องเล็กยาวต่างกันในการทำคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

3-3. กฎการแทนที่ของไวน์กล่าวว่า ความยาวคลื่นสูงสุดเป็นไมโครเมตร สำหรับรังสีที่ได้จากวัตถุดำที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda_{\max} T = 2.90 \times 10^3$$

T อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน จงคำนวณความยาวคลื่นสูงสุดสำหรับวัตถุดำที่มีความร้อน (ก) 4000 องศาเคลวิน (ข) 2000 องศาเคลวิน (ค) 1000 องศาเคลวิน

3-4. กฎของสตีฟานกล่าวว่าพลังงานทั้งหมด E_t ที่เปล่งจากวัตถุดำต่อหน่วยเวลาและต่อหน่วยพื้นที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_t = \alpha T^4$$

α มีค่า 5.69×10^{-8} วัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเคลวินกำลังสี่

จงคำนวณพลังงานทั้งหมดที่เปล่งออกมาเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรของวัตถุแต่ละชนิดในข้อ 3

3-5. จงใช้ความสัมพันธ์ของโจทย์ข้อ 3 และ 4 แก้ปัญหาต่อไปนี้

(ก) จงคำนวณความยาวคลื่นที่ใส่หลอดทั้งสแตนเปล่งรังสีออกมา โดยหลอดนี้ทำงานที่อุณหภูมิปกติ 2870 องศาเคลวิน และที่อุณหภูมิ 3000 องศาเคลวิน

(ข) จงคำนวณพลังงานทั้งหมดที่ปล่อยจากหลอดนี้เป็นวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

3-6. จงบอกความแตกต่างระหว่างการเปล่ง (ปล่อย) แบบทันทีทันใด และการเปล่งแบบถูกกระตุ้น

3-7. จงหาเหตุผลมาอธิบายว่าเลเซอร์สี่ระดับดีกว่าเลเซอร์สามระดับ

3-8. จงอธิบายแถบความกว้างยังผลของฟิลเตอร์

3-9. ฟิลเตอร์แทรกสอดอันหนึ่งใช้แยกแถบดูดกลืน CS_2 ที่ความยาวคลื่น 4.54 ไมโครเมตร

(ก) ถ้าใช้ฟิลเตอร์นี้ให้รังสีอันดับหนึ่งผ่าน ฟิลเตอร์นี้จะต้องมีชั้นไดอิเล็กทริกหนาเท่าใด (ดรรชนีหักเห 1.34)

(ข) ความยาวคลื่นที่ผ่านออกมามีค่าเท่าใด

3-10. อินเทอร์เฟอเรนซ์เวดจ์ขนาด 10 เซนติเมตร มีค่าการกระจายเชิงเส้น จาก 400 ถึง 700 นาโนเมตร ฟิเลเตอร์นี้จะต้องมีชั้นไดอิเล็กทริกหนาเท่าใด ถ้าชั้นนี้มีดรรชนีหักเห 1.32

3-11. ทำไมตัวทำแสงเอกรงค์ปริซึมแก้วจึงดีกว่าฟิวส์ซิลิกาเมื่อใช้งานในช่วงความยาวคลื่นจาก 400 ถึง 800 นาโนเมตร

3-12. จะต้องใช้เกรตติงที่มีจำนวนร่องต่อมิลลิเมตรเท่าไรเมื่อต้องการให้เส้นเลี้ยวเบนอันดับหนึ่งของความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ถูกเลี้ยวเบนที่มุม -40 องศา ถ้ามุมตกมีค่า 60 องศา

3-13. เกรตติงแผ่นหนึ่งใช้งานในช่วงอินฟราเรด มี 72 ร่องต่อมิลลิเมตร และมีพื้นที่ 10.0 นาโนเมตร จงคำนวณการแยกอันดับหนึ่งของเกรตติงนี้ ($\lambda/\Delta\lambda$) ร่องสองร่องจะต้องห่างกันเท่าใด (ต่อเซนติเมตร) ถ้าศูนย์กลางของความยาวคลื่นที่ต้องการแยกอยู่ที่ 1000 ต่อเซนติเมตร

3-14. จงคำนวณความยาวคลื่นของสเปกตรัมอันดับหนึ่งและสองของโจทย์ข้อ 13 ที่มุมสะท้อน (ก) -20 องศา (ข) 0 องศา (ค) $+20$ องศา สมมติมุมตกมีค่า 50 องศา

3-15. ใช้รูป 3-2 แนะนำการใช้วัสดุในการสร้างชั้นส่วนเพื่อใช้ในอุปกรณ์วิเคราะห์

(ก) หาแถบดูดกลืนของโครงสร้างละเอียดในช่วง 450 ถึง 750 นาโนเมตร

(ค) ชุดอุปกรณ์ใช้หาปริมาณเหล็กในน้ำธรรมชาติโดยใช้หลักการดูดกลืนรังสีสีแดงของสารเชิงซ้อน $\text{Fe}(\text{SCN})^{2+}$

(ข) หาสเปกตรัมดูดกลืนในช่วงใกล้อินฟราเรด (20 ถึง 50 ไมโครเมตร)

(ง) การหาไนโตรเบนซีนในตัวอย่างอากาศโดยดูพีคดูดกลืนที่ 11.8 ไมโครเมตร

(จ) หาความยาวคลื่นสั้นที่เปล่งจากเปลวไฟของธาตุโลหะในช่วง 200 ถึง 780 นาโนเมตร

(ฉ) ศึกษาสเปกตรัมในช่วงอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศ

(ช) ศึกษาสเปกตรัมในช่วงใกล้อินฟราเรด

3-16. เลนส์ต้องมีความเร็วเท่าใด ถ้ามีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.2 เซนติเมตรและความยาวโฟกัส 8.1 เซนติเมตร

3-17. จงเปรียบเทียบกำลังรวมแสงของเลนส์ในโจทย์ข้อ 16 กับเลนส์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.6 เซนติเมตร และความยาวโฟกัส 8.1 เซนติเมตร

3-18. ตัวทำแสงเอกรงค์หนึ่งมีความยาวโฟกัส 1.6 เมตร กระจกรวมแสงมีเส้นผ่าศูนย์กลาง

กลาง 2.0 เซนติเมตร เกรตติงที่ใช้กระจาย 1250 ร่องต่อมิลลิเมตร สำหรับการเลี้ยวเบน
อันดับหนึ่ง

(ก) กำลังการแยกของตัวทำแสงเอกรงค์มีค่าเท่าใด ถ้าลำรังสีในแนวขนานชนเกรต
ติงยาว 2.0 เซนติเมตร

(ข) ส่วนกลับการกระจายเชิงเส้นอันดับหนึ่งและสองของตัวทำแสงเอกรงค์นี้

3-19. ตัวทำแสงเอกรงค์หนึ่งมีความยาวโฟกัส 0.65 เมตร มีเกรตติงชนิดเอชเลต 2000
ร่อง ต่อมิลลิเมตร

(ก) จงคำนวณส่วนกลับการกระจายเชิงเส้นของอุปกรณ์นี้สำหรับสเปกตราอันดับ
หนึ่ง

(ข) ถ้าลำรังสีชนเกรตติงยาว 3.0 เซนติเมตร กำลังการแยกอันดับหนึ่งของตัวทำ
แสงเอกรงค์นี้มีค่าเท่าใด

(ค) ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร จงหาผลต่างความยาวคลื่นต่ำสุดทางทฤษฎี
ที่อุปกรณ์นี้แยกได้สมบูรณ์

3-20. จงอธิบายหลักการของเครื่องตรวจหารังสีชนิดซิลิคอนไดโอด

3-21. จงบอกความแตกต่าง (ก) สเปกโทรสโกป (ข) สเปกโทรกราฟ (ค) สเปก
โทรโฟโตมิเตอร์