



การเปรียบเทียบยิลด์แสงของผลึกซินทิลเลเตอร์ YAG:Ce, LuAG:Ce และ GAGG:Ce
Comparison of Light Yield for YAG:Ce, LuAG:Ce, and GAGG:Ce Scintillators

อัศคพงษ์ พันธุ์พุกภัย^{1*} วรณศย์ ทองพูล¹ ศรีวราฐ ใจเย็น¹ อำพล ใจรักภัย¹ และ Hua Shu Hsu²

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

²National Pingtung University, Pingtung City, Pingtung County 90003, Taiwan

*E-mail: akapong_p@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน วัสดุเรืองรังสีได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในงานตรวจจับรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ด้านงานสร้างภาพทางการแพทย์ วัสดุเรืองรังสีที่ดีและเหมาะสมกับงานทางด้านนี้ควรมีสมบัติดังนี้ คือ ให้ยิลด์แสงสูง ค่าแยกชัดพลังงานดี หดขยี้รังสีพลังงานสูงได้ และตอบสนองต่อรังสีได้ไว ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติยิลด์แสงของผลึกเรืองรังสี 3 ชนิด คือ ผลึก YAG:Ce ผลึก LuAG:Ce และผลึก GAGG:Ce เมื่อนำไปเชื่อมต่อกับหลอดทวีคูณแสงยี่ห้อ Hamamatsu รุ่น R6231 และกระตุ้นด้วยโฟตอนพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 ความแรง 0.25 μ Ci พบว่าผลึก GAGG:Ce เปล่งแสงได้เข้มที่สุด คือ 46,100 ph/MeV ในขณะที่ผลึก YAG:Ce และผลึก LuAG:Ce มีค่ายิลด์แสงเท่ากับ 32,600 ph/MeV และ 18,100 ph/MeV ตามลำดับ ค่ายิลด์แสงที่มากที่สุดของผลึก GAGG:Ce นี้ ส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกมีค่าดีที่สุดด้วยคือ 7.00% ในขณะที่ผลึก YAG:Ce และผลึก LuAG:Ce มีค่าแยกชัดพลังงานคือ 7.24% และ 8.89% ตามลำดับ และค่าอัตราส่วนฟิคต่อคอมป์ตันของผลึกทั้งหมดได้ถูกอภิปรายไว้ด้วย

คำสำคัญ: ยิลด์แสง อัตราส่วนฟิคต่อคอมป์ตัน ค่าแยกชัดพลังงาน YAG:Ce GAGG:Ce LuAG:Ce

Received: April 28, 2019

Revised: July 03, 2019

Accepted: August 30, 2019

Abstract

Nowadays, scintillation materials play a major role in gamma-ray and X-ray detections, in particular medical imaging. Good scintillation crystals for this application should have the following properties: high light yield, good energy resolution, high stopping power and fast response time. The aim of this research is to study the light yield property of three types of the scintillation crystals, namely YAG:Ce, LuAG:Ce, and GAGG:Ce crystals. We take them to couple with the Hamamatsu R6321 photomultiplier tube and stimulate them by 662 keV energy photons from 0.25 μ Ci Cs-137 gamma-source. We found that the GAGG:Ce crystal shows the highest light yield of 46,100 ph/MeV while the YAG:Ce and the LuAG:Ce crystals show light yield of 32,600 ph/MeV and 18,100 ph/MeV, respectively. The highest light yield of the GAGG:Ce crystal results in it's the best energy resolution value of 7.00%. While the energy resolution values of the YAG:Ce and the LuAG:Ce crystals are 7.24% and 8.89%, respectively. The peak to Compton ratio values for all crystals is also discussed.

Keywords: Light Yield, Peak to Compton Ratio, Energy Resolution, YAG:Ce, GAGG:Ce, LuAG:Ce

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ด้านการเกษตร ด้านการแพทย์ ด้านธรณีวิทยา ด้านการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย [1] และด้านงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ แต่รังสีเป็นสิ่งที่มองไม่เห็นและเป็นอันตรายต่อมนุษย์หากได้รับในปริมาณที่มากเกินไป มนุษย์จึงจำเป็นต้องตรวจวัด และควบคุมปริมาณรังสีที่ใช้งานอย่างจริงจัง ซึ่งการตรวจวัดจำเป็นต้องมีตัวรับรู้ซึ่งสามารถแปลงพลังงานของรังสีให้รับรู้ได้ วัสดุเรืองรังสี (scintillation materials) คือวัสดุที่สามารถแปลงพลังงานของรังสีที่มนุษย์มองไม่เห็นให้เป็นแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ วัสดุเรืองรังสีถูกค้นพบโดยบังเอิญตั้งแต่ปี ค.ศ.1904 โดย วิลเลียม ครุกส์ โดยเขาได้ใช้สารประกอบสังกะสีซัลไฟด์ (ZnS) ในการนับวัดรังสีที่มากกกระทบ แต่เป็นการนับวัดที่ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ซึ่งต่อมาได้เลิกใช้เทคนิคนี้ เนื่องจากความไม่สะดวก แต่ในปี ค.ศ. 1940 เทคนิคนี้ได้กลับมาเป็นที่นิยมอีกครั้งเนื่องจาก

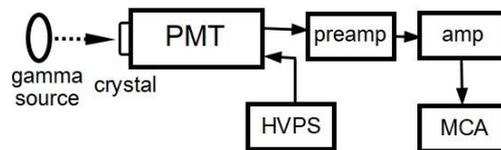
มีสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพสูงมาช่วยในการเปลี่ยนแสงจางๆ ให้กลายเป็นสัญญาณพัลส์ไฟฟ้า อุปกรณ์ชนิดนี้ก็คือหลอดทวีคูณแสง (photomultiplier tube) ซึ่งในปัจจุบัน วัสดุเรืองรังสีได้ถูกค้นพบและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีความต้องการอย่างสูงในด้านงานวินิจฉัยด้วยรังสีทางการแพทย์ วัสดุเหล่านี้ถูกใช้เป็นตัววัดรังสีในเครื่องมือวินิจฉัยหลายชนิด ในปี ค.ศ.2005 Mecher และคณะ [2] ได้รายงานไว้ว่า ทั่วโลกวัสดุเหล่านี้ถูกใช้ในเครื่อง PET (positron emission tomography) ประมาณ 30 ตัน ในเครื่อง X-ray CT (X-ray computed tomography) ประมาณ 22 ตัน และในเครื่อง SPECT (single-photon emission tomography) ประมาณ 10 ตัน ปัจจุบันปริมาณการใช้งานในแต่ละประเภทยิ่งสูงขึ้นหลายเท่าตัว มีงานวิจัยหลายงานที่ได้ศึกษาสมบัติของวัสดุเหล่านี้อย่างจริงจัง เช่น van Eijk [3] Moszynski [4] และเมื่อเร็วๆ นี้คือ Lecoq และคณะ [5] โดยในงานเหล่านี้พบว่าวัสดุเรืองรังสีที่มี

ประสิทธิภาพสูงสุด คือผลึกเรืองรังสีเชิงเดี่ยวชนิดอนินทรีย์ (inorganic scintillation single crystals) ผลึกที่ดี และเหมาะกับงานสร้างภาพด้วยรังสีทางการแพทย์ควรมีสมบัติดังนี้ คือ เปล่งแสงเข้ม ค่าแยกชัดพลังงานดี ค่าแยกชัดในตัวดี ตอบสนองต่อรังสีได้ไว ไม่มีเอาฟเตอร์โกว์ หยุดยั้งรังสีพลังงานสูงได้ และไม่ดูดความชื้น ในงานวิจัยนี้ นักวิจัยได้ศึกษาสมบัติอิมิตต์แสงของผลึกเรืองรังสี 3 ชนิด ซึ่งเป็นผลึกอนินทรีย์ตระกูลกาเนตที่ถูกเจือด้วยธาตุซีเรียม (Ce^{3+}) ได้แก่ ผลึก YAG:Ce ผลึก LuAG:Ce และผลึก GAGG:Ce เนื่องจากในปัจจุบัน ผลึกกลุ่มที่เจือด้วยธาตุซีเรียมนี้เป็นกลุ่มที่เปล่งแสงเข้มมาก ผลึก YAG:Ce ได้ถูกรายงานไว้ว่าเป็นผลึกรุ่นเก่าที่สามารถตอบสนองต่อรังสีได้ไวมาก มีความหนาแน่น 4.56 g/cm^3 และ เลขอะตอมยังผล (effective atomic number) ของผลึกคือ 35 [6] ขณะที่ผลึก LuAG:Ce ได้ถูกรายงานไว้ว่าเป็นผลึกที่มีความหนาแน่นสูง คือ 6.67 g/cm^3 มีเลขอะตอมยังผล 58.9 และ ตรวจจับรังสีแกมมาพลังงานสูงได้ดี [7] และผลึกที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่อย่างผลึก GAGG:Ce เป็นผลึกที่กำลังได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากมีช่องว่างพลังงานที่แคบจึงทำให้เปล่งแสงได้เข้มมากคือประมาณ $40,000 \text{ ph/MeV}$ และมีความหนาแน่นประมาณ 6.5 g/cm^3 [8]

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

ผลึกที่ใช้ในการทดสอบคือผลึกอิตเทรียมอะลูมิเนียมกาเนต ($Y_3Al_5O_{12}:Ce$; YAG:Ce) ผลึกลูทีเชียมอะลูมิเนียมกาเนต ($Lu_3Al_5O_{12}:Ce$; LuAG:Ce) และผลึกกาโดลิเนียมอะลูมิเนียมกาเนต ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$; GAGG:Ce) ผลึกทั้ง 3 ชนิดถูกเจือด้วยธาตุซีเรียม และมีรูปร่างเหมือนกันคือ $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ ผลึก YAG:Ce ผลิตโดยบริษัท EPIC

Crystal ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ผลึก LuAG:Ce ผลิตโดยบริษัท Crytur ประเทศสาธารณรัฐเช็ก และผลึก GAGG:Ce ผลิตโดยบริษัท Furukawa ประเทศญี่ปุ่น ผลึกทั้ง 3 ชนิด ถูกปลูกด้วยวิธี Czochralski นำผลึกทั้ง 3 ชนิด ไปทดสอบเพื่อหาสเปกตรัมการปลดปล่อยแสง และหาความยาวคลื่นแสงที่ผลึกปลดปล่อยด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์ (photoluminescence technique) จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในระบบตรวจวัดรังสีแกมมาดังแสดงในรูปที่ 1

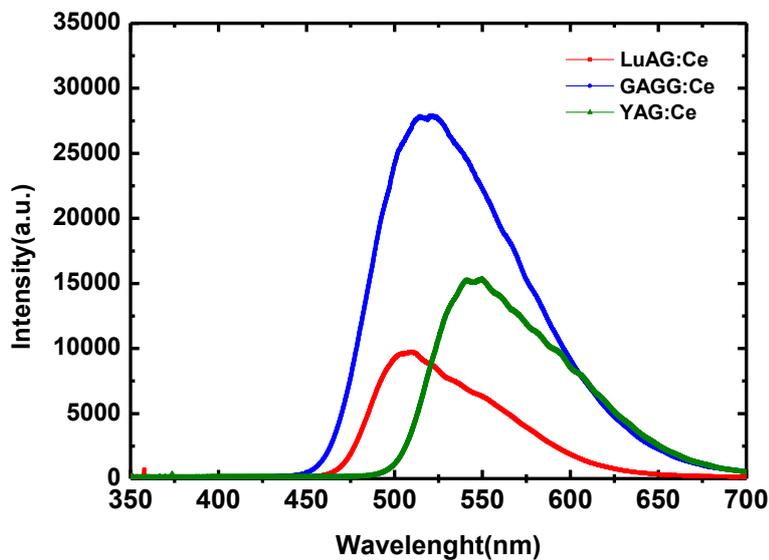


รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา

การทดสอบอิมิตต์แสงทำได้โดยการนำผลึกมาเชื่อมต่อกับ หน้าต่างของหลอดทวีคูณแสง (photomultiplier tube; PMT) ยี่ห้อ Hamamatsu รุ่น R 6231 โดยใช้ซิลิโคนกรีสมาช่วยในการเชื่อมต่อเพื่อประสานรอยต่อระหว่างผลึกกับหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสง ผลึกจะถูกพันด้วยเทปขาวทั้ง 5 ด้านหลายชั้น เหลือด้านล่างไว้เชื่อมต่อกับหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสง การพันเทปขาวจะช่วยให้แสงที่เปล่งออกมาจากผลึกสะท้อนและเข้าสู่หลอดทวีคูณแสง ได้มากขึ้น และต้องพันเทปดำอีกหลายชั้นเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเข้าไปรบกวนภายในหลอดทวีคูณแสง เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ตามรูปที่ 1 นำแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 พลังงาน 662 keV ขนาด $0.25 \mu\text{Ci}$ มาวางไว้หน้าผลึก เมื่อโฟตอนจากแหล่งกำเนิดรังสีตกกระทบผลึก ผลึกจะเปลี่ยนโฟตอนของรังสีให้กลายเป็นโฟตอนของแสงที่ตามองเห็นมากมายหลายตัว

โฟตอนแสงเหล่านี้จะเข้าสู่หลอดทวีคูณแสง และตกกระทบแผ่นโฟโตแคโทด (photocathode) ภายในหลอดทวีคูณแสง อิเล็กตรอนที่แผ่นโฟโตแคโทดจะหลุดออก และถูกดึงให้ไปชนที่ขั้วไดโนด (dynode) ที่อยู่ถัดมาด้วยศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า อิเล็กตรอนที่ขั้วไดโนดนี้จะหลุดเพิ่มอีก 1 ตัว และทั้ง 2 ตัวจะถูกดึงให้ไปชนกับขั้วไดโนดที่อยู่ถัดไป เป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ อิเล็กตรอนจะหลุดเพิ่มและสุดท้ายจะไปสะสมที่ขั้วแอนโนด (anode) ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงสุด หลอดทวีคูณแสงนี้จะทำงานได้

ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้า 750 V ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง (high voltage power supply; HVPS) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากหลอดทวีคูณแสงจะถูกส่งต่อไปยังวงจรรขยายสัญญาณส่วนหน้า (preamplifier; preamp) ยี่ห้อ CAEN รุ่น A1424 วงจรรขยายสัญญาณ (amplifier; amp) และเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (multichannel analyzer; MCA) ยี่ห้อ CAEN รุ่น N8315 เพื่อแสดงผลและบันทึกสเปกตรัมด้วยโปรแกรม mc^2 และนำสเปกตรัมที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 2 สเปกตรัมการปลดปล่อยแสงของผลึกทั้ง 3 ชนิด

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

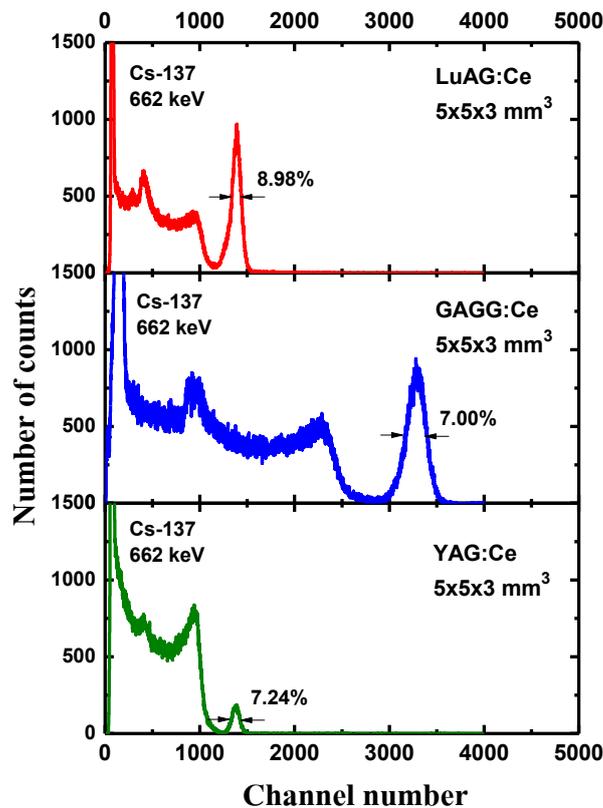
3.1 สเปกตรัมการปลดปล่อยแสง

ในรูปที่ 2 แสดงผลการทดสอบสเปกตรัมของการปลดปล่อยแสงของผลึกทั้ง 3 ชนิด ด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์ พบว่า ผลึก LuAG:Ce ผลึก GAGG:Ce และผลึก YAG:Ce มีความยาวคลื่นของการปลดปล่อยแสงสูงสุด (peak emission wavelength) อยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 510 nm 520 nm และ 550 nm ตามลำดับ ความยาวคลื่นที่

ปลดปล่อยออกมาที่เกิดขึ้นในอะตอมของธาตุซีเรียม (Ce^{3+}) ที่เป็นสารเจือในผลึกทั้งสาม ซึ่งระดับพลังงานของการปลดปล่อยแสงจะอยู่ในช่องว่างพลังงาน (energy band gap) ของโครงผลึกหลัก (host) เกิดจากการย้ายระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากชั้น $5d^1$ (สถานะกระตุ้น) ลงไปสู่ชั้น $4f$ (สถานะพื้น) ของธาตุซีเรียม ถึงแม้ว่าผลึกทั้ง 3 ชนิดจะเป็นผลึกที่มีโครงสร้างแบบกัรบเนตเหมือนกัน แต่ชนิดของอะตอมที่อยู่ตำแหน่งต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน

ขนาดอะตอมไม่เท่ากัน จึงทำให้ความยาวของแขนในแต่ละพันธะแตกต่างกัน ทำให้สนามผลึก (crystal field) แตกต่างกันไปด้วย จึงส่งผลให้ธาตุซีเรียมที่เป็นสารเจือในโครงผลึกหลักมีความกว้างของระดับชั้นพลังงานไม่เท่ากันไปด้วย ความยาวคลื่น

แสงที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีค่าไม่เท่ากัน ความยาวคลื่นแสงที่ได้นี้ต้องนำไปใช้ในการตรวจสอบความสามารถในการตอบสนองต่อแสงของขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสงสำหรับการทดสอบกับรังสีแกมมาต่อไป



รูปที่ 3 สเปกตรัมรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด Cs-137 ที่ตรวจวัดด้วยผลึกทั้ง 3 ชนิด

3.2 ยิลด์แสง (Light Yield)

ยิลด์แสง ถูกนิยามให้เป็นจำนวนโฟตอนแสงที่เปล่งออกมาจากผลึกเมื่อมีโฟตอนรังสีแกมมาพลังงาน 1 MeV 1 โฟตอน มาตกกระทบผลึก ผลการทดสอบยิลด์แสงเมื่อกระตุ้นด้วยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137 แสดงดังรูปที่ 3 จากรูปจะสังเกตเห็นว่าเมื่อใช้เงื่อนไขในการขยายสัญญาณไฟฟ้าเท่ากัน

สเปกตรัมที่วัดได้ด้วยผลึก GAGG:Ce ตำแหน่งกึ่งกลางของโฟโตพีค (photo-peak) จะอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ตามคือ หมายเลขช่อง (channel number) ที่ใกล้ที่สุดคือ หมายเลขช่องที่ 1,369 และ 1,367 ตามลำดับ แสดงว่าจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสงของผลึก GAGG:Ce มีค่ามากที่สุด ส่วนของผลึก

LuAG:Ce และ ผลึก YAG:Ce มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ผลึก GAGG:Ce มีค่ามากกว่าผลึกทั้งสองประมาณ 2.4 เท่า แต่ถ้าต้องการทราบปริมาณอิเล็กตรอนที่เปล่งออกมาจากผลึกทั้ง 3 ชนิดจริง ๆ จำเป็นต้องทราบค่าประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency; Q.E.) ของข้อั้วโฟโตแคโทดของหลอดทวิคูณแสงรุ่น R6231 ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่ใช้ทำข้อั้วโฟโตแคโทด โดยจะสามารถคำนวณหาจำนวนโฟตอนที่เปล่งออกมาจากผลึกได้จากสมการที่ (1) คือ

$$Q.E. = (N_{phel} / N_{ph}) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ N_{phel} คือ จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากข้อั้วโฟโตแคโทด และ N_{ph} คือ จำนวนโฟตอนแสงที่ตกกระทบข้อั้วโฟโตแคโทด จากผลการทดสอบหาค่าความยาวคลื่นในการปลดปล่อยแสงของผลึกทั้งสามในหัวข้อที่ 3.1 พบว่า ผลึก LuAG:Ce ผลึก GAGG:Ce และผลึก YAG:Ce มีความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยคือ 510 nm 520 nm และ 550 nm ตามลำดับ ซึ่งเมื่อตรวจสอบค่า Q.E. ก็จะได้ค่าคือ 20.9 % 19.6% และ 11.6% ตามลำดับ และเมื่อนำมาคำนวณหาจำนวนโฟตอนแสงที่เปล่งออกมาจากผลึกจะได้ค่าเท่ากับ 11,980 photon 30,540 photon และ 21,550 photon ตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นอิเล็กตรอนแสงก็จะมีค่าเท่ากับ 18,100 ph/MeV 46,100 ph/MeV และ 32,600 ph/MeV ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 แสดงว่าผลึก GAGG:Ce ปลดปล่อยแสงออกมาเข้มที่สุด และ

มากกว่าผลึก YAG:Ce และผลึก LuAG:Ce โดยที่แสงของผลึก GAGG:Ce มีค่าเท่ากับ 1.4 เท่า และ 2.5 เท่าของผลึก YAG:Ce และผลึก LuAG:Ce ตามลำดับ เนื่องจากผลึก GAGG:Ce ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ให้มีช่องว่างพลังงานที่แคบลงจึงส่งผลให้สามารถผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) ได้มากกว่าผลึกชนิดอื่น [9] ค่าอิเล็กตรอนแสงของผลึก GAGG:Ce ที่วัดได้ คือ 46,100 ph/MeV ในงานนี้มีค่ามากกว่า 41,300 ph/MeV ในเอกสารอ้างอิง [10] ที่เป็นตัวอย่างตัวเดียวกัน เนื่องจากหลอดทวิคูณแสงที่ใช้ในทั้ง 2 งาน แตกต่างกัน และการเชื่อมต่อนอกกับหน้าต่างของหลอดทวิคูณแสงอาจทำได้ไม่ดีเท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าอิเล็กตรอนแสงที่วัดได้คือ 47,900 ph/MeV โดย Sakthong และคณะ [11] พบว่าค่าที่ได้ยังน้อยกว่าเล็กน้อย สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากรูปร่างของตัวอย่างที่ใช้แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ ผลึกที่ใช้มีความหนาแน่นมากกว่าคือ 3 mm ในขณะที่ในงานของ Sakthong และคณะ [11] ความหนาแน่นคือ 1 mm ผลึกที่หนาแน่นกว่าจะดูดกลืนแสงที่เปล่งออกมาด้วยตัวเองมากกว่าจึงทำให้แสงที่ออกมาลดลงตามงานวิจัยของ Wojtowicz และคณะ [12] ในส่วนของผลที่ได้ของผลึก LuAG:Ce และผลึก YAG:Ce กับงานในเอกสารอ้างอิง [13] พบว่า แม้จะเป็นตัวอย่างตัวเดียวกันแต่เมื่อใช้หลอดทวิคูณแสงคนละชนิดกัน ค่าที่ได้ก็จะให้ผลแตกต่างกันไปด้วย ซึ่งอาจจะมีผลมาจากความสามารถในการเชื่อมต่อนอกของผลึกกับหน้าต่างของหลอดทวิคูณแสงในแต่ละครั้งไม่เท่ากันอีกด้วย

ตารางที่ 1 จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน จำนวนโฟตอน ยิลด์แสง และค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้ง 3 ชนิด

ผลึก	จำนวนโฟโต- อิเล็กตรอน (photoelectrons)	ประสิทธิภาพ- ควอนตัม (%)	จำนวนโฟตอน (photons)	ยิลด์แสง (ph/MeV)	ค่าแยกชัด- พลังงาน (%)
LuAG:Ce	2,504	20.9	11,980	18,100	8.98
GAGG:Ce	5,985	19.6	30,540	46,100	7.00
YAG:Ce	2,500	11.6	21,550	32,600	7.24

3.3 อัตราส่วนพีคต่อคอมป์ตัน

เมื่อสังเกตรูปร่างของสเปกตรัมจากผลึกทั้ง 3 ชนิดจะพบว่าขนาดของโฟโตพีคเมื่อเทียบกับส่วนของคอมป์ตัน (peak-to-Compton ratio, PCR) ของผลึกทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกัน เมื่อคำนวณค่า PCR ของผลึกทั้งสามจะพบว่าผลึก LuAG:Ce ผลึก GAGG:Ce และผลึก YAG:Ce มีค่า PCR คือ 2.31 1.77 และ 0.21 ตามลำดับ ค่า PCR นี้คือค่าที่บอกละเอียดความสามารถในการดักจับรังสีพลังงานสูง หัววัดที่ดีควรมีค่านี้นี้มาก ๆ ความสามารถในการดักจับรังสีจะขึ้นอยู่กับปริมาตรหรือขนาดของหัววัด ความหนาแน่น (ρ) และเลขอะตอมยังผล (Z_{eff}) ของวัสดุที่ใช้ทำเป็นหัววัด จากค่าที่ได้ทำให้ทราบว่าผลึก LuAG:Ce มีความสามารถในการดักจับรังสีสูงที่สุด รองลงมาคือผลึก GAGG:Ce และความสามารถน้อยที่สุดคือผลึก YAG:Ce เนื่องจากผลึกทั้ง 3 ชนิด มีปริมาตรเท่ากัน เหตุผลที่ทำให้ความสามารถในการดักจับรังสีแตกต่างกันจึงขึ้นกับความหนาแน่น และเลขอะตอมยังผลของผลึกเท่านั้น ผลึก LuAG:Ce มีค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมยังผลสูงที่สุด คือ 6.67 g/cm^3 และ 58.9 ส่วนผลึก GAGG:Ce มีค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมยังผลรองลงมาคือ 6.5 g/cm^3 และ 54.4 ในขณะที่ผลึก YAG มีค่าความหนาแน่น และ

เลขอะตอมยังผลของผลึกน้อยที่สุด คือ 4.56 g/cm^3 และ 35 (ความสามารถในการดักจับรังสี $\sim \rho Z_{\text{eff}}^5$ [14]) นี้คือเหตุผลที่ทำให้ความสามารถในการดักจับรังสีพลังงานสูงแตกต่างกัน

3.4 ค่าแยกชัดพลังงาน

ในส่วนของค่าแยกชัดพลังงานก็เป็นอีกหนึ่งสมบัติที่มีความสำคัญมากสำหรับงานด้านการตรวจวัดรังสี เนื่องจากคือค่าความละเอียดในการตรวจวัดซึ่งจะทำให้การตรวจวัดมีประสิทธิภาพ และสามารถแปลผลได้อย่างถูกต้อง โดยค่าแยกชัดพลังงานนี้มีความสัมพันธ์กับปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจากผลึกหรือยิลด์แสง ดังสมการที่ (2) [15]

$$(\Delta E/E)^2 = \delta_{\text{st}}^2 + \delta_{\text{sc}}^2 + \delta_{\text{p}}^2 \quad (2)$$

โดยที่ $\Delta E/E$ คือ ค่าแยกชัดพลังงาน δ_{st} คือ ค่าแยกชัดของหลอดทวิคูณแสง δ_{sc} คือ ค่าแยกชัดในตัวผลึก และ δ_{p} คือ ค่าแยกชัดเนื่องจากการเชื่อมต่อของผลึกกับหน้าต่างของหลอดทวิคูณแสง โดยค่า δ_{st} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\delta_{\text{st}} = 2.355 \times (1+\mathcal{E})^{1/2} \times N^{-1/2} \quad (3)$$

โดยที่ \mathcal{E} คือ ค่าความแปรปรวนในอัตราขยาย จำนวนอิเล็กตรอนในหลอดทวิคูณแสง และ N คือ

จำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทด จากสมการ (2) และ (3) จะสังเกตเห็นว่าค่าแยกชัดพลังงาน ($\Delta E/E$) สัมพันธ์กับปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจากผลึก คือถ้าผลึกเปล่งแสงเข้ม จำนวนโฟโตอิเล็กตรอน (N) จะสามารถหลุดออกมาได้มาก ซึ่งจะทำให้ค่า δ_s มีค่าดี คือมีค่าน้อย (ยิ่งน้อยยิ่งดี) ก็จะส่งผลให้ค่า $\Delta E/E$ มีค่าดีตามไปด้วย (ยิ่งน้อยยิ่งดี) จากผลการทดลองในตารางที่ 1 พบว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce มีค่าดีที่สุดคือ 7.00% ซึ่งสอดคล้องกับค่าขีดจำกัด เนื่องจากผลึก GAGG:Ce เปล่งแสงเข้มที่สุดในขณะที่ผลึก LuAG:Ce ก็มีค่าแยกชัดพลังงานที่แย่มากที่สุดคือ 8.98% เนื่องจากผลึก LuAG:Ce เปล่งแสงออกมาน้อยที่สุด ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก GAGG:Ce ที่วัดได้คือ 7.00% นี้มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดได้ในงานของ Sakthong และคณะ [11] คือ 6.8% ซึ่งเป็นผลึกที่มีความหนาแน่นกว่างานวิจัยในครั้งนี้

4. สรุปผลการวิจัย

การตรวจสอบปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจากผลึกสามารถทำได้โดยการสังเกตจากสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอ MCA และเปกตรัมของการปลดปล่อยแสงจากการทดสอบ พบว่า ผลึกที่เปล่งแสงออกมาเข้มที่สุด คือผลึก GAGG:Ce และรองลงมา คือ ผลึก YAG:Ce และผลึก LuAG:Ce ตามลำดับ ผลึก GAGG:Ce สามารถเปล่งแสงได้เข้มกว่าผลึกอื่น จึงส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกมีค่าดีตามไปด้วย ถึงแม้ว่าปริมาณแสงที่เปล่งออกมาจะมีค่ามากกว่า และค่าแยกชัดพลังงานจะมีค่าดีกว่าผลึกอื่น ๆ แต่นักวิทยาศาสตร์ส่วนใหญ่ยังคงหวังว่า ปริมาณแสงที่เปล่งออกมามากขนาดนี้ควรทำให้ค่าแยกชัด

พลังงานของผลึกน่าจะมีค่าดีกว่านี้ แนวทางการพัฒนาผลึกชนิดนี้ยังไม่หยุดนิ่ง เพื่อให้ผลึกเหล่านี้พร้อมและเหมาะกับการนำไปใช้งานในเครื่องวินิจฉัยด้วยรังสีทางการแพทย์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทำงานวิจัย งบประมาณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2560 และอีกส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาอาจารย์มืออาชีพด้วยการฝึกประสบการณ์วิชาชีพ ต่างประเทศ ระหว่างวันที่ 14 พฤษภาคม – 9 มิถุนายน 2560 ณ National Pingtung University (NPTU) ประเทศไต้หวัน และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัวที่อยู่เคียงข้าง และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญที่สุดเสมอมา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] เฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี นเรศร์ จันทน์ขาว และ สมยศ ศรีสถิตย์. การปรับปรุงความเร็วการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์มสำหรับการตรวจสอบชิ้นงานทางอุตสาหกรรมโดยไม่ทำลาย. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร. ธัญบุรี*. 2558. 5(2): 59-73.
- [2] Mecher C.L. Perspectives on the future development of new scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2005. 537: 6-14.
- [3] van Eijk C.W.E. Inorganic-scintillator development. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2001. 460: 1-14.

- [4] Moszynski M. Inorganic scintillation detectors in γ -ray spectrometry. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2003. 505: 101-110.
- [5] Lecoq P., Annenkov A., Gektin A., Korzhik M., and Pedrini C. *Inorganic Scintillators for Detector Systems*. Springer, Netherlands. 2006.
- [6] Moszynski M., Ludziejewski T., Wolski D., Klamra W., and Norlin L.O. Properties of the YAG:Ce scintillator. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. A*. 1994. 345(3): 461-467.
- [7] Nikl M., Mihokova E., Mares J.A., Vedda A., Martini M, Nejezchleb K., and Blazek K. Traps and timing characteristics of LuAG:Ce³⁺ scintillator. *Phys. Stat. Sol.(b)*. 2000. 181: R10-R12.
- [8] Kamada K., Endo T., and Tsutumi K. Composition engineering in cerium-doped (Lu,Gd)₃(Ga,Al)₅O₁₂ single - crystal scintillators. *Crys Growth Des*. 2011. 11: 4484-4490.
- [9] Chewpraditkul W., Pattanaboonmee N., Sakthong O., Chewpraditkul W., Szczesniak T., Moszynski M., Kamada K., Kurosawa S., Yoshikawa A., and Nikl M. Scintillation properties of Gd₃(Al_{5-x}Ga_x)O₁₂:Ce (x = 2.3, 2.6, 3.0) single crystals. *Opt. Mater*. 2018. 81 : 23-29.
- [10] อัครพงษ์ พันธุ์พุกภัย วรณุศย์ ทองพูล และ ศราวุธ ใจเย็น. ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกซีนทิลเลชัน GAGG:Ce สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมา. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข*. 2562. 47(1): 134-143.
- [11] Sakthong O., Chewpraditkul W., Wanarak C., Kamada K., Yoshikawa A., Prusa P., and Nikl M. Scintillation properties of Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce³⁺ single crystal scintillators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*. 2014. 751: 1-5.
- [12] Wojtowicz A.J., Drozdowski W., Ptasyk M., Galazka Z., and Lefaucheur J.L. Scintillation light yield of Ce-doped LuAP and LuYAP pixel crystals, *Proceeding of SCINT 2005 Conference*. 2005: 473-476: 23-29.
- [13] อัครพงษ์ พันธุ์พุกภัย วรณุศย์ ทองพูล และ ศราวุธ ใจเย็น. ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงและค่าแยกชัดพลังงานของผลึกซีนทิลเลเตอร์ LuAG:Ce และ YAG:Ce สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.ธัญบุรี*. 2560. 7(1): 88-98.
- [14] Fernandes F., Brasil L, and Guadagnin R. *Mammography techniques and review*. IntechOpen, Croatia. 2015.
- [15] Moszynski M., Zalipska J., Balcerzyk M., Kapusta M., Mengesha W., and Valentine J.D. Intrinsic energy resolution of NaI(Tl)¹. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. A*. 2002. 484(1-3): 259-269.

