บทความวิจัย

การเปรียบเทียบผลึกเชิงเดี่ยว YSO, LYSO และ LSO ที่เจือด้วย Ce^{3+} สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมา

อัคคพงศ์ พันธุ์พฤกษ์* และ วรนุศย์ ทองพูล

บทคัดย่อ

บทความนี้ คณะผู้วิจัยได้เปรียบเทียบคุณลักษณะซินทิลเลชันของผลึก 3 ชนิด ได้แก่ YSO(Ce), LYSO(Ce) และ LSO(Ce) ผลึกที่ถูกศึกษาทั้งหมดผลิตจาก 3 บริษัทในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ผลึก YSO(Ce) แสดงค่าแยกชัดพลังงานที่ดีที่สุดคือประมาณ 9.1% ซึ่งดีกว่า 11.3% และ 10.6% ที่ได้จากผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) ตามลำดับ สำหรับที่พลังงาน 662 keV ผลึก LSO(Ce) และ LYSO(Ce) แสดงปริมาณแสงที่เปล่งออกมาใกล้เคียงกัน ในขณะที่ผลึก YSO(Ce) เปล่งแสงออกมาน้อยที่สุด ในช่วงพลังงานตั้งแต่ 31 keV ถึง 1,333 keV ความเป็นสัดส่วนของยิลด์แสงต่อค่าพลังงานรังสีแกมมาของผลึกทั้งสามได้ถูกวัด ค่าโฟโตแฟรกชันโดยประมาณของผลึกทั้งสามได้ถูกรายงานและเปรียบเทียบกับค่าอัตราส่วนของภาคตัดขวางที่คำนวณด้วยโปรแกรม WinXCom

คำสำคัญ: ค่าแยกชัดพลังงาน ปริมาณแสงที่เปล่งออกมา LSO(Ce) LYSO(Ce) YSO(Ce)

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: akapong_p@rmutt.ac.th

Comparison of YSO, LYSO and LSO Single Crystals Doped with Ce^{3+} for Gamma Ray Detection

Akapong Phunpueok* **and Voranuch Thongpool**

ABSTRACT

In this paper, we compared scintillation characteristics of three types of crystals, namely YSO(Ce), LYSO(Ce) and LSO(Ce). All studied crystals were supplied by three companies in P.R. China. The YSO(Ce) sample shows the best energy resolution of about 9.1% which is better than 11.3% and 10.6% for the LYSO(Ce) and LSO(Ce) samples, respectively. For a gamma ray energy of 662 keV, the LSO(Ce) and LYSO(Ce) samples show comparable light output, while the YSO(Ce) sample is the worst. Over the energy range of 31-1,333 keV, the light yield proportional characteristic versus gamma ray energy of all the samples was measured. The estimated photo-fraction of all tested samples was reported and compared to the cross-sectional ratio computed using the WinXCom program.

Keywords: energy resolution, light output, LSO(Ce), LYSO(Ce), YSO(Ce)

Division of Physics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.
*Corresponding author, e-mail: akapong_p@rmutt.ac.th

บทนำ

ผลึกซินทิลเลชันคือผลึกที่สามารถเปลี่ยนโฟตอนของรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบให้กลายเป็นโฟตอนของแสงที่ตามองเห็นหรือรังสียูวี ความสามารถในการลดพลังงานของโฟตอนลงทำให้ง่ายต่อการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การพัฒนาผลึกซินทิลเลชันได้เริ่มต้นขึ้นเมื่อปลายศตวรรษที่ 19 และภายในช่วง 20 ปีที่ผ่านมานี้ จำนวนของผลึกซินทิลเลชันชนิดใหม่ๆ ก็ได้ถูกค้นพบและพัฒนาขึ้นอย่างแพร่หลาย ผลึกหลายชนิดได้ถูกพัฒนาจนสามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกตระกูลออกไซด์ที่ถูกเจือด้วย Ce^{3+} สำหรับในวงการการแพทย์นั้นผลึกเหล่านี้ได้มีบทบาทที่สำคัญยิ่ง โดยเฉพาะด้านการสร้างภาพจากรังสีเอกซ์และแกมมา และใช้อยู่ในเครื่องวินิจฉัยโรคด้วยรังสีหลายชนิด เช่น เครื่อง positron emission tomography (PET) เครื่อง X-ray computed tomography (CT) เครื่อง single-photon emission computed tomography (SPECT) เครื่องมือวินิจฉัยโรคเหล่านี้จำเป็นต้องมีตัวตรวจจับรังสีที่มีคุณภาพสูงเพื่อทำให้การสร้างภาพจากรังสีที่ได้มีความถูกต้อง แม่นยำ เพื่อการแปลผลที่ถูกต้อง ปัจจุบันผลึกที่ใช้ในเครื่องวินิจฉัยเหล่านี้ยังมีการพัฒนาที่ไม่หยุดนิ่ง โดยผลึกที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานด้านนี้คือผลึกที่มีความหนาแน่นสูง ค่าแยกชัดพลังงานดีเยี่ยม ตอบสนองต่อรังสีได้รวดเร็ว และไม่ดูดความชื้น ผลึกที่ได้รับความสนใจเป็นพิเศษสำหรับงานด้านนี้ก็คือ ผลึกตระกูลออกไซด์ที่ถูกเจือด้วย Ce^{3+} ไม่ว่าจะเป็นผลึกลูทีเชียมออกซีออโตซิลิเกท (lutetium oxyorthosilicate, Lu_2SiO_2:Ce, LSO(Ce)) [1, 2] หรือผลึกลูทีเชียมอิตเทรียมออกซีออโตซิลิเกท (lutetium yttrium oxyorthosilicate, $(Lu,Y)_2SiO_5$:Ce, LYSO(Ce)) [3, 4] เนื่องจากผลึกทั้งสองชนิดนี้มีคุณสมบัติหลายอย่างที่น่าสนใจ เช่น เปล่งแสงเข้ม ความหนาแน่นสูง มีค่าโฟโตแฟรกชันสูง ไม่ดูดความชื้น ในบทความนี้คณะผู้วิจัยได้นำเสนอคุณสมบัติซินทิลเลชันของผลึก Lu_2SiO_5:Ce (LSO(Ce)) และผลึก $Lu_{1.8}Y_{0.2}SiO_5$:Ce (LYSO(Ce)) โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลึก Y_2SiO_5:Ce (YSO(Ce)) [5] ได้ทำการศึกษา ค่ายิลด์แสง ค่าแยกชัดพลังงาน ค่าแยกชัดในตัว ค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง ของผลึกทั้งสาม ภายใต้พลังงานของรังสีแกมมาตั้งแต่ 31 keV ถึง 1,333 keV โดยทดลองที่อุณหภูมิห้อง (room temperature) จากผลการทดลองที่ได้รับ ค่าจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนต่อพลังงานรังสีแกมมา ค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง และค่าแยกชัดในตัวของผลึกที่ถูกศึกษาทั้งหมดได้ถูกคำนวณหาค่า ค่าโฟโตแฟรกชันโดยประมาณของผลึกทั้งหมดที่พลังงาน 662 keV ได้ถูกคำนวณและเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณโดยโปรแกรม WinXCom [6] ไว้ด้วย

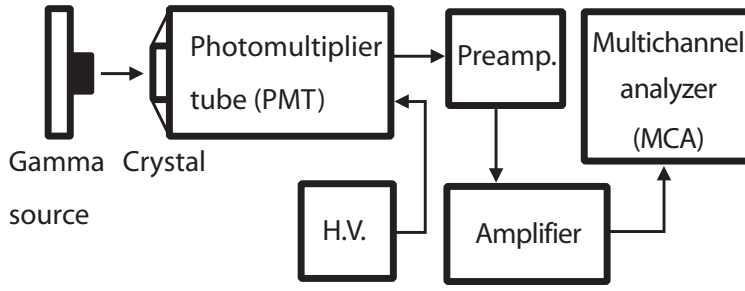
อุปกรณ์และวิธีทดลอง

ผลึกซินทิลเลชัน 3 ชิ้น กล่าวคือ ผลึก LSO(Ce) ผลึก LYSO(Ce) และผลึก YSO(Ce) ด้วยขนาดที่เท่ากันคือ 5 mm × 5 mm × 3 mm ผลิตจากบริษัท Hangzhou Shalom Electro-optics Technology บริษัท Kinheng Crystal Material (Shanghai) และ บริษัท EPIC Crystal ตามลำดับ ผลึก LSO(Ce) และผลึก YSO(Ce) ถูกปลูกโดยวิธี Czochralski ในขณะที่ผลึก LYSO(Ce) ถูกปลูกโดยวิธี Bridgeman ผลึกทั้ง 3 ชนิดถูกเจือ Ce^{3+} ความเข้มข้น 0.5% โดยที่ผลึกแต่ละชนิดจะถูกนำมาพันด้วยเทปขาวทั้ง 5 ด้านหลายรอบ เหลือด้านล่างเอาไว้ เพื่อให้แสงที่เปล่งออกจากผลึกสะท้อนเข้าสู่หลอดทวีคูณแสงให้มากที่สุด จากนั้นนำหน้าที่ไม่ได้พันมาเชื่อมต่อกับหน้าต่างของหลอดทวีคูณแสงรุ่น XP5200B PMT โดยใช้ silicone grease ในการเชื่อมต่อเพื่อยึดผลึกให้อยู่กับที่และช่วยประสานช่องว่างของรอยต่อ

ระหว่างผลึกกับหน้าต่างหลอดทวีคูณแสง จากนั้นนำเทปดำมาคลุมทับหลายชั้นเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเข้ามารบกวนหลอดทวีคูณแสง

จากนั้นนำแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาทีละตัว (^{133}Ba ^{214}Am ^{22}Na ^{137}Cs และ ^{60}Co) มาวางไว้ห่างจากผลึกพอสมควรตามภาพที่ 1 เมื่อโฟตอนรังสีแกมมามาตกกระทบผลึก ผลึกจะเปลี่ยนโฟตอนของรังสีแกมมาให้กลายเป็นโฟตอนแสงจำนวนมากมาย โฟตอนแสงนี้จะเคลื่อนที่เข้าสู่หลอดทวีคูณแสง เมื่อโฟตอนแสงตกกระทบกับขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสง อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากขั้ว ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric effect) โฟโตอิเล็กตรอนจะถูกเพิ่มจำนวนโดยการถูกเร่งให้ชนขั้วไดโนด (dynode) หลายๆ ตัวที่อยู่ภายในหลอดด้วยแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนที่ถูกขยายทั้งหมดจะมาสะสมอยู่ที่ขั้วแอโนด กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า และถูกส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณส่วนหน้ารุ่น CANBERRA 2005 preamplifier และถูกส่งต่อไปยังวงจรขยายสัญญาณรุ่น Tennelec TC243 amplifier และสัญญาณไฟฟ้าจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง Tukan 8K Multichannel analyzer [7] เพื่อวิเคราะห์ แสดง และบันทึกสเปกตรัมของรังสีที่วัดได้

ค่าแยกชัดพลังงาน (energy resolution) คือความสามารถในการแยกแยะพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้ามาในระบบวัด คำนวณได้จากความกว้างของโฟโตพีค (photo-peak) ของสเปกตรัมรังสีแกมมาที่ปรากฏขึ้นบนหน้าจอ MCA และหารด้วยค่ากลางของโฟโตพีคคูณด้วย 100 มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ สามารถหาได้จากโปรแกรม Tukan 8K โดยการกำหนดขอบเขตของโฟโตพีคบนหน้าจอ MCA ค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอนในหน่วย phe/MeV คือค่าของจำนวนโฟโตอิเล็กตรอน (phe) ที่หลุดออกมาจากขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสงเมื่อมีรังสีแกมมา 1 โฟตอนพลังงาน 1 MeV เข้ามาตกกระทบผลึก สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งของโฟโตพีคบนหน้าจอ MCA เทียบกับตำแหน่งของพีคโฟโตอิเล็กตรอนเดี่ยว (single photoelectron peak) ที่วัดขณะที่ไม่มีผลึก โดยใช้ตัวคูณจากวงจรขยาย และความต่างศักย์ที่ป้อนให้หลอดทวีคูณแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นวิธีการเทียบสัดส่วนของ Bertolaccini [8] ส่วนค่ายิลด์แสงในหน่วย ph/MeV คือค่าจำนวนโฟตอนของแสง (ph) ที่เปล่งออกมาจากผลึกเมื่อมีรังสีแกมมา 1 โฟตอนพลังงาน 1 MeV เข้ามาตกกระทบผลึก สามารถคำนวณได้จากจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วโฟโตแคโทดเมื่อมีโฟตอนของแสงมาตกกระทบ โดยดูจากความสามารถในการเปลี่ยนโฟตอนแสงให้เป็นโฟโตอิเล็กตรอน (ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก) ของโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสง



ภาพที่ 1 แผนภาพระบบตรวจวัดรังสีแกมมา

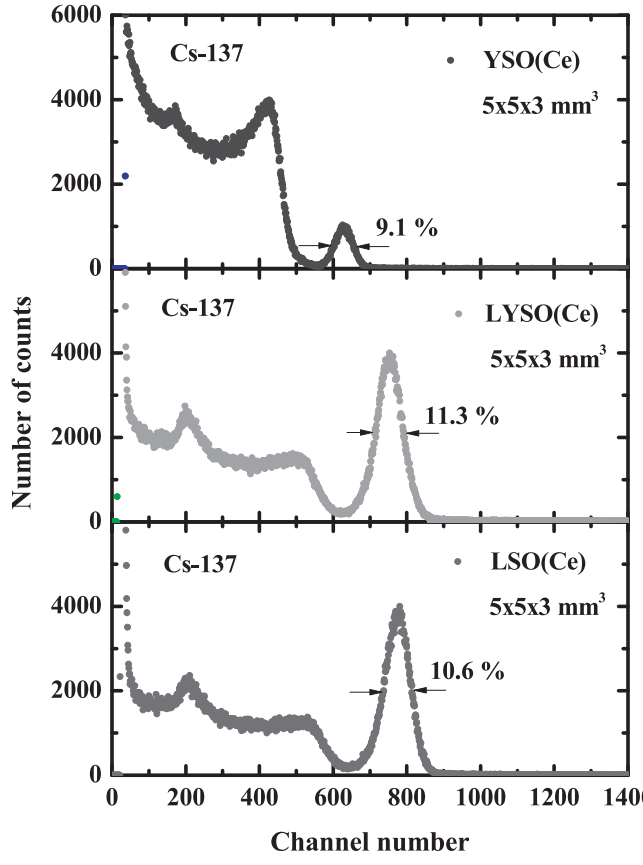
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ยิลด์แสงและค่าแยกชัดพลังงาน

ภาพที่ 2 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs ที่วัดโดยผลึก YSO(Ce) ผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) ที่มีขนาดเท่ากันคือ 5 mm × 5 mm × 3 mm โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 700 โวลต์ ในการป้อนให้กับหลอดทวีคูณแสงเพื่อให้หลอดสามารถทำงานได้ และตั้งค่าในการขยายสัญญาณไฟฟ้าของวงจรขยายสัญญาณ (amplifier) คือ coarse gain เท่ากับ 10 fine gain เท่ากับ 0.3 และ shaping time เท่ากับ 4 μs จากภาพจะพบว่าตำแหน่งของโฟโตพีคของผลึก LSO(Ce) จะอยู่ทางขวามือมากที่สุดนั่นหมายความว่าผลึก LSO(Ce) ให้ปริมาณแสงที่เปล่งออกมาเข้มที่สุดในขณะที่ผลึก YSO(Ce) ให้ปริมาณแสงที่เปล่งออกมาน้อยที่สุด ส่วนค่าแยกชัดพลังงานที่ได้ ผลึก YSO(Ce) จะมีค่าดีที่สุดคือ 9.1% ในขณะที่ค่าแยกชัดพลังงานของผลึก LYSO(Ce) นั้นแย่ที่สุดคือ 11.3% ส่วนรูปร่างของสเปกตรัม โฟโตพีคของผลึก YSO(Ce) จะมีขนาดเล็กที่สุด (ดูในหัวข้อ โฟโตแฟรกชัน) จากภาพที่ 2 นี้สามารถสรุปเป็นค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอน ยิลด์แสง และค่าแยกชัดพลังงาน ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ยิลด์โฟโตอิเล็กตรอน ยิลด์แสง และค่าแยกชัดพลังงาน ที่พลังงานรังสีแกมมา 662 keV วัดโดยผลึกทั้งหมด

Crystal	Photoelectron yield (phe/MeV)	Photon yield (ph/MeV)	Energy resolution (%)
YSO(Ce)	7,300 ± 370	27,000 ± 2,700	9.1 ± 0.5
LYSO(Ce)	8,448 ± 420	31,400 ± 3,100	11.3 ± 0.6
LSO(Ce)	8,720 ± 440	32,300 ± 3,200	10.6 ± 0.5



ภาพที่ 2 สเปกตรัมของรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ที่วัดโดยผลึกทั้ง 3 ชนิด

จากตารางที่ 1 ได้แสดงค่ายิลด์โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron yield) ที่ถูกคำนวณด้วยวิธีของ Bertolaccini [8] และคำนวณเป็นยิดล์แสง (photon yield) โดยใช้ค่าประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency, Q.E.) ของขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสง ซึ่งค่าที่ใช้สำหรับหลอดทวีคูณแสงรุ่น XP5200B PMT ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 420 nm (ความยาวคลื่นแสงที่ผลึกทั้งสามเปล่งออกมา) มีค่า Q.E. เท่ากับ 27% ถึงแม้ว่าปริมาณแสงที่เปล่งออกมาของผลึก LSO(Ce) จะมีค่าสูงที่สุดแต่ค่าแยกชัดพลังงานของมันกลับมีค่าดีกว่าผลึก LYSO(Ce) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และก็แย่กว่าค่าแยกชัดพลังงานของผลึก YSO(Ce) อย่างเห็นได้ชัด การที่เป็นเช่นนี้อาจมีสาเหตุจากค่าแยกชัดในตัวและค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิดล์แสงที่แย่กว่า ค่าแยกชัดพลังงาน 9.1% ที่วัดโดยผลึก YSO(Ce) นั้นมีค่าดีกว่าค่าแยกชัดพลังงาน 9.3% ที่วัดได้โดยผลึก YSO(Ce) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าในเอกสารอ้างอิง [5]

ค่าแยกชัดพลังงาน ($\Delta E/E$) ของพีคพลังงานเต็ม (full energy peak) ที่วัดโดยผลึกซินทิลเลชันเชื่อมต่อกับหลอดทวีคูณแสงสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [9]

$$(\Delta E/E)^2 = (\delta_{sc})^2 + (\delta_{st})^2 \quad (1)$$

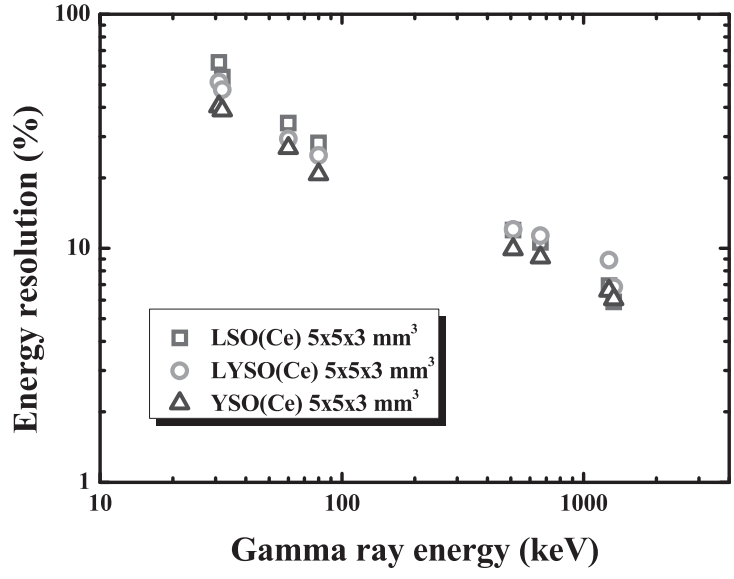
โดยที่ δ_{sc} คือ ค่าแยกชัดในตัวผลึก (Intrinsic resolution) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง ค่าความเป็นเนื้อเดียวกันของผลึก และความบกพร่องในผลึก [9, 10] และ δ_{st} คือ ค่าแยกชัดทางสถิติของหลอดทวีคูณแสง (PMT resolution) ซึ่ง δ_{st} สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\delta_{st} = 2.355 \times 1/N^{1/2} \times (1+\varepsilon)^{1/2} \quad (2)$$

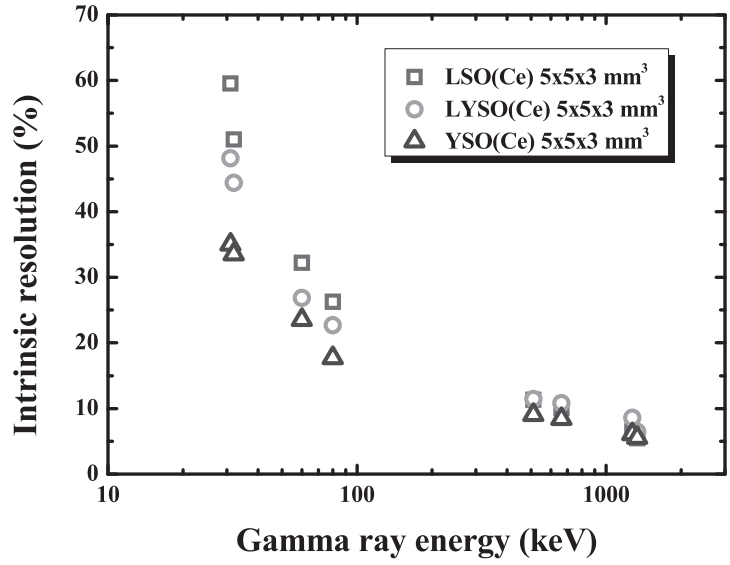
โดยที่ N คือ จำนวนของโฟโตอิเล็กตรอนที่ผลิตจากขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสง และ ε คือ ค่าความแปรปรวนของเกนในการขยายอิเล็กตรอนภายในหลอดทวีคูณแสง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 สำหรับหลอดทวีคูณแสงรุ่น XP5200B PMT ค่าแยกชัดพลังงานและค่าแยกชัดทางสถิติของหลอดทวีคูณแสงสามารถหาได้จากการทดลอง ค่าแยกชัดในตัวของผลึกจะสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$(\delta_{sc})^2 = (\Delta E/E)^2 - (\delta_{st})^2 \quad (3)$$

จากภาพที่ 3 และ 4 แสดงค่าแยกชัดพลังงานและค่าแยกชัดในตัวตามลำดับ ค่าแยกชัดพลังงานในภาพที่ 3 สำหรับผลึก YSO(Ce) มีค่าดีกว่าผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) เกือบทุกๆ พลังงานเนื่องจากค่าแยกชัดในตัวในภาพที่ 4 สำหรับผลึก YSO(Ce) เหนือกว่าผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) อย่างชัดเจน การวิเคราะห์ค่าแยกชัดพลังงานที่ 662 keV ของผลึกทั้งสามได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2



ภาพที่ 3 ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้ง 3 ชนิด



ภาพที่ 4 ค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้ง 3 ชนิด

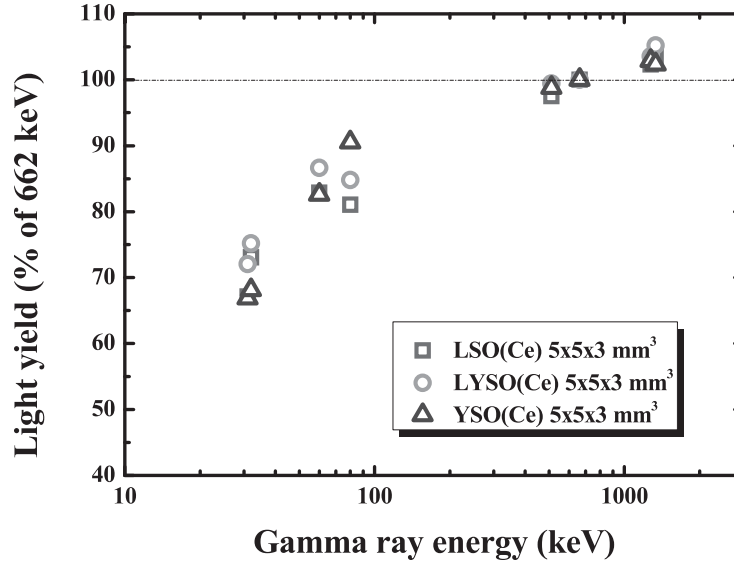
จากตารางที่ 2 จะพบว่าจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ผลิตจากขั้วโฟโตแคโทดในหลอดทวีคูณแสงที่วัดโดยผลึก LSO(Ce) นั้นมีค่ามากที่สุดแต่ค่าแยกชัดพลังงานที่วัดได้กลับแย่กว่าที่วัดโดยผลึก YSO(Ce) แต่เมื่อมาสังเกตที่ค่าแยกชัดในตัวจะพบว่าผลึก YSO(Ce) นั้นมีค่าแยกชัดในตัวที่ดีที่สุดจึงส่งผลให้ค่าแยกชัดพลังงานดีที่สุดด้วย ในขณะที่ผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) เป็นผลึกที่มีข้อดีคือมีความหนาแน่นสูง แต่ข้อด้อยก็คือยังไม่สามารถทำให้ค่าแยกชัดพลังงานมีค่าดีกว่าผลึกรุ่นเก่าๆ เช่นผลึก YSO(Ce) เพื่อให้เข้าใจมากขึ้นจะมาวิเคราะห์ถึงค่าส่วนประกอบของค่าแยกชัดในตัวกันต่อ โดยปกติแล้วค่าแยกชัดในตัวคือค่าแยกชัดที่เกิดจากตัวผลึก ซึ่งเกิดจากส่วนประกอบที่สำคัญคือ ค่าความเป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความบกพร่องในผลึก และ ค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง [9, 10] ทั้งความเป็นเนื้อเดียวกันและความบกพร่องของผลึกสามารถลดได้โดยการปรับปรุงเทคนิคในขั้นตอนการปลูกผลึก ในขณะที่ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงยังเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของผลึกที่แก้ไขได้ค่อนข้างยาก

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ค่าแยกชัดพลังงานที่ 662 keV จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ^{137}Cs สำหรับผลึกที่ถูกศึกษาทั้งหมด

Scintillator	N (electrons)	Energy resolution (%)		
		ΔE/E	δ_{st}	δ_{sc}
YSO(Ce)	4,830	9.1 ± 0.5	3.5 ± 0.2	8.4 ± 0.4
LYSO(Ce)	5,610	11.3 ± 0.6	3.3 ± 0.2	10.8 ± 0.5
LSO(Ce)	5,770	10.6 ± 0.5	3.2 ± 0.2	10.1 ± 0.5

ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง

คุณสมบัติความไม่เป็นสัดส่วนของยิดล์แสงที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานรังสีแกมมาสามารถเป็นเหตุผลสำคัญในการทำให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกแย่ลง [10] ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงของผลึกซินทิลเลชันถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของยิดล์แสงที่วัดจากตำแหน่งโฟโตพีคที่เกิดจากการวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่แตกต่างกันเทียบกับยิลด์แสงที่วัดจากตำแหน่งโฟโตพีคที่เกิดจากการวัดพลังงานรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV



ภาพที่ 5 ความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่เป็นฟังก์ชันกับพลังงานของรังสีแกมมาของผลึกทั้งสาม

ภาพที่ 5 แสดงคุณสมบัติความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงของผลึกทั้งหมดที่ถูกทดสอบ ตามปกติแล้วผลึกที่ดีควรมีค่าความเป็นสัดส่วนของยิลด์แสงที่ดี คือหมายความว่าผลึกตัวเดิมควรจะมีปริมาณของแสงที่เปล่งออกมาเท่าเดิมถ้าพลังงานที่ตกกระทบผลึกไม่เปลี่ยนแปลง (นั่นก็คือค่ายิลด์แสง) แต่จากการทดสอบพบว่าปริมาณของแสงที่เปล่งออกมากลับไม่เท่าเดิมเมื่อต้นกำเนิดรังสี (gamma ray sources) เปลี่ยนชนิดไป ค่ายิลด์แสงที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถดูได้จากการนำค่ายิดล์แสงที่พลังงาน 662 keV มาเป็นตัวเทียบ(หาร) ถ้าความเป็นสัดส่วนดี แสดงว่าปริมาณยิลด์แสงของทุกๆ พลังงานควรจะมีค่าเท่ากันทั้งหมด ผลหารที่ได้ต้องเท่ากับ 1 นั่นก็คือ 100% ของทุกๆ จุดในกราฟ แต่จากผลการทดลองกลับพบว่า ค่ายิดล์แสงมีค่าลดลงจากพลังงาน 662 keV จนมาถึงพลังงาน 31 keV ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่ายิลด์แสงของผลึก LYSO(Ce) มีค่าลดลง 28% ซึ่งดีกว่า (ลดลงน้อยกว่า) ประมาณ 33% ที่เป็นของผลึก LSO(Ce) และผลึก YSO(Ce) ถ้าเปรียบเทียบจากกราฟอาจจะดูค่อนข้างยาก เพื่อที่จะทำให้การเปรียบเทียบง่ายขึ้น Dorenbos [11] ได้เสนอค่าระดับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง (degree of non-proportionality, σ_{np}) ซึ่งคำนวณตลอดช่วงพลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกทดสอบ

$$\sigma_{np} = [(1/N) \sum_{i=1}^{N} ([Y(E_i)/Y(662)]-1)^2]^{1/2} \quad (4)$$

โดยที่ σ_{np} คือค่าระดับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสง N คือ จำนวนค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่ทำการทดลอง $Y(E_i)$ คือ ยิลด์แสงของผลึกซินทิลเลชันที่พลังงานต่างๆ และ Y(662) คือ ยิลด์แสงของผลึกซินทิลเลชันที่พลังงาน 662 keV จากการคำนวณพบว่าค่าระดับความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงของผลึก LYSO(Ce) มีค่าเท่ากับ 0.16 ส่วนผลึก LSO(Ce) และผลึก YSO(Ce) มีค่าเท่ากันคือ 0.19 ค่านี้สำหรับผลึก LSO(Ce) ที่ถูกทดสอบมีค่าดีกว่า 0.22 ของผลึก LSO(Ce) ที่ถูกทดสอบในเอกสารอ้างอิง [11] ผลนี้ชี้ให้เห็นว่าผลึกยุคใหม่ส่วนใหญ่สามารถปรับปรุงค่าความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงให้ดีขึ้นได้ ถึงแม้ว่าผลึก LYSO(Ce) จะมีค่า σ_{np} ที่ดีที่สุดแต่ค่านี้ก็ยังไม่สามารถทำให้ค่าแยกชัดในตัวของผลึกนี้ดีที่สุด (ดูตารางที่ 2) แสดงว่าความไม่เป็นเนื้อเดียวกันและความบกพร่องของผลึก LYSO:Ce ยังไม่ถูกปรับปรุง

โฟโตแฟรกชัน

ค่าโฟโตแฟรกชัน (Photo-fraction) ถูกนิยามเป็นค่าอัตราส่วนของพื้นที่ใต้โฟโตพีคเทียบกับพื้นที่ของสเปกตรัมของรังสีแกมมาทั้งหมดวัดที่พลังงานรังสีต่างๆ ค่าโฟโตแฟรกชันของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV จากแหล่งกำเนิด ^{137}Cs วัดโดยผลึกทั้งสามได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 3 ค่าอัตราส่วนของภาคตัดขวางของการดูดกลืนจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเทียบกับการดูดกลืนจากปรากฏการณ์ทั้งหมด (Photoelectric effect + Compton effect) ได้ถูกคำนวณโดยโปรแกรม WinXCom ไว้เปรียบเทียบด้วย จากข้อมูลจะพบว่าผลึก LSO(Ce) มีค่าโฟโตแฟรกชันที่มากที่สุด ผลนี้เกิดขึ้นเนื่องจากค่าเลขอะตอมยังผล (effective atomic number, Z_{eff}) และค่าความหนาแน่นที่มากที่สุดของผลึก LSO(Ce) ค่าที่ได้นี้ก็มีแนวโน้มเดียวกับค่าอัตราส่วนของภาคตัดขวาง (σ-ratio) ที่คำนวณโดยโปรแกรม WinXCom

ตารางที่ 3 ค่าโฟโตแฟรกชันของรังสีแกมมาที่พลังงาน 662 keV ที่วัดโดยผลึกทั้ง 3 ชนิด

Scintillator	Z_{eff}	Density (g/cm^3)	Sizes	Photo-fraction (%)	σ-ratio (%)
YSO(Ce)	34	4.5	(5×5×3) mm^3	3.5	3.2
LYSO(Ce)	63.5	7.2	(5×5×3) mm^3	26.4	21.9
LSO(Ce)	66	7.5	(5×5×3) mm^3	27.9	23.8

สรุปผลการทดลอง

จากการตรวจสอบคุณสมบัติซินทิลเลชันของผลึกทั้งสาม พบว่าผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) แสดงคุณสมบัติการเปล่งแสงเข้มกว่าผลึก YSO(Ce) แต่ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสองกลับแย่กว่าผลึก YSO(Ce) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องมาจากค่าแยกชัดในตัวของผลึกทั้งสองที่แย่กว่าผลึก YSO(Ce) เมื่อตรวจสอบถึงความไม่เป็นสัดส่วนของยิลด์แสงก็พบว่าจริงๆ นั้นผลึก LYSO(Ce) มีค่าดีที่สุด จึงพอทำให้สามารถสรุปได้ว่า ทั้งผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) ควรปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันของผลึก ความสม่ำเสมอของ Ce^{3+} ในผลึก และความบกพร่องต่างๆ ในผลึก ซึ่งจะทำให้ค่าแยกชัดในตัวดี

อย่างที่คาดหวังและจะทำให้ค่าแยกชัดพลังงานของผลึกทั้งสองดีตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามทั้งผลึก LYSO(Ce) และผลึก LSO(Ce) ก็ยังคงน่าสนใจสำหรับการนำไปใช้ในเครื่องวินิจฉัยโรคด้วยรังสีอยู่ เนื่องจากผลึกทั้งสองมีค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมยังผลที่สูงซึ่งเหมาะสำหรับการหยุดยั้งรังสีพลังงานสูงได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับการทำวิจัย งบประมาณทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2558 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วีระพงศ์ จิ๋วประดิษฐ์กุล อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สมัยเรียนปริญญาโทและปริญญาเอกที่ได้สั่งสอน ให้คำแนะนำในหลายๆ เรื่องด้านวิชาการ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ระดับสูงต่างๆ และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัวที่ให้กำลังใจและอยู่เคียงข้างกันเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

1. Melcher, C.L., and Schweeitzer, J.S. 1992. Cerium-doped lutetium oxyorthosilicate; a fast, efficient new scintillator. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 39(4): 502-505.
2. Wanarak, C., Chewpraditkul, W., and Phunpueok, A. 2012. Light yield non-proportionality and energy resolution of $Lu_{1.95}Y_{0.05}SiO_5$:Ce and Lu_2SiO_5 scintillation crystals. *Procedia Engineering.* 32: 765-771.
3. Wanarak, C., Chewpraditkul, W., and Phunpueok, A. 2011. Light yield non-proportionality and energy resolution of $Lu_{1.8}Y_{0.2}SiO_5$:Ce and $LaCl_3$:Ce scintillation crystals. *Advanced Materials Research.* 284-286: 2002-2007.
4. Phunpueok, A., and Thongpool, V. 2016. Interaction of 662 keV gamma rays with LYSO(Ce) and BGO single crystal scintillators. *Key Engineering Materials.* 675-676: 764-767.
5. Chewpraditkul, W., Wanarak, C., Szczesniak, T., Moszynski, M., Jary, V., Beitlerova, A., and Nikl, M. 2013. Comparison of absorption, luminescence and scintillation characteristics in $Lu_{1.95}Y_{0.05}SiO_5$:Ce and Y_2SiO_5:Ce scintillators. *Optical Materials.* 35(9): 1679-1684.
6. Gerward, L., Guilbert, N., Jensen, K.B., and Levrning, H. 2004. WinXCom-a program for calculating x-ray attenuation coefficients. *Radiation Physics and Chemistry.* 71(3-4): 653-654.
7. Guzik, Z., Borsuk, S., Traczyk, K., and Plominski, M. 2006. TUKAN-an 8k pulse height analyzer and multi-channel scaler with a PCI or a USB interface. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 53(1): 231-235.

8. Bertolaccini, M., Cova, S., and Bussolati, C. 1968. A technique for absolute measurement of the effective photoelectron per keV yield in scintillation counters. Proceeding of International Symposium on Nuclear Electronics. 10-13 September 1968, Versailles, France.
9. Moszynski, M., Zalipska, J., Balcerzyk, M., Kapusta, M., Mengesha, W., and Valentine, J.D. 2002. Intrinsic energy resolution of NaI(Tl)[1]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerator, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 484(1-3): 259-269.
10. Dorenbos, P., de Haas, J.T.M., and van Eijk, C.W.E. 1995. Non-proportionality in the scintillation response and energy resolution obtainable with scintillation crystals. *IEEE Transactions on Nuclear Science.* 42(6): 2190-2202.
11. Dorenbos, P. 2002. Light output and energy resolution of Ce^{3+}-doped scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerator, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 486: 208-213.

ได้รับบทความวันที่ 22 เมษายน 2559
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 24 สิงหาคม 2559