การเปล่งแสงและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีของแก้วยิตเตรียมซิลิโกบอเรตที่เจือด้วยดิสโพเซียม 3+

Photoluminescence and Radioluminescence of Dy^{3+}-doped Yttrium Silicoborate Glass

ณัฐกฤตา จันทิมา[1,2], เยาวลักษณ์ ทาริวงศ์[1,2] และจักรพงษ์ แก้วขาว[1,2,*]

[1]*สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*
[2]*ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม*
[*]*natthakridta@webmail.npru.ac.th*

บทคัดย่อ

การเปล่งแสงและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีของแก้วยิตเตรียมซิลิโกบอเรต (CaYSiB) ที่เจือ Dy_2O_3 ปริมาณความเข้มข้น 0.5 ร้อยละโดยโมล ได้รับการตรวจวัด ตัวอย่างแก้วถูกเตรียมด้วยวิธีการหลอมและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 1400 องศาเซลเซียส สมบัติการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วถูกตรวจสอบภายใต้การกระตุ้นด้วยอัลตราไวโอเลตและรังสีเอ็กซ์ พบการเปล่งแสงที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $^4F_{9/2}$ ไปยัง $^6H_{15/2}$, $^6H_{13/2}$, $^6H_{11/2}$ และ $^6H_{9/2}$+$^6F_{11/2}$ กับการเปล่งแสงที่มีความเข้มมากของแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 482 นาโนเมตร ($^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$) และสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร ($^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$) ตัวอย่างแก้วที่เจือด้วย Dy^{3+} มีการสลายตัวทางเวลาที่สั้นด้วยเช่นกัน ผลการศึกษาพบว่าแก้วใสยิตเตรียมซิลิโกบอเรตที่เจือ Dy^{3+} มีแนวโน้มของการเป็นวัสดุซินทิลเลชัน

คำสำคัญ: การเปล่งแสง, การเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสี, แก้ว, เวลาการเปล่งแสง

Abstract

Photoluminescence (PL) and radioluminescence (RL) of yttrium silicoborate glass doped (CaYSiB) with 0.5 mol% Dy_2O_3 were examined. The glass sample was prepared by melt - quenching technique at 1400 °C. The luminescence properties were investigated under UV and X-ray excitation. The luminescence that correspond to the energy transition from $^4F_{9/2}$ to $^6H_{15/2}$, $^6H_{13/2}$, $^6H_{11/2}$ และ $^6H_{9/2}$+$^6F_{11/2}$ were observed with intense blue (482 nm; $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$) and yellow (575 nm; $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$) emissions. The PL decay time of glass sample was also shortened by doping Dy^{3+}. The results showed that Dy^{3+}-doped yttrium silicoborate transparent glass is promising scintillation materials.

Keywords: photoluminescence, radioluminescence, Glass, Decay time

1. บทนำ

วัสดุซินทิลเลเตอร์ (Scintillator) หรือ วัสดุซินทิลเลชัน (Scintillation materials) เป็นชื่อเฉพาะของวัสดุที่มีการเปล่งแสงออกมา เมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีประเภทต่าง ๆ (บางครั้งอาจเรียกว่า Radioluminescence) โดยในกรณีของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา ส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุซิลทิลเลอร์ประเภทอนินทรีย์ (Inorganic scintillator) (Van Eijk, 2001: 1) นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ในด้านการแพทย์ เช่น อุปกรณ์สร้างภาพทางการแพทย์ (Medical imaging) และอุปกรณ์ Positron emission tomography (PET) (Moszynski, 2003: 101) เป็นต้น และใช้อย่างกว้างขวางในวงการฟิสิกส์นิวเคลียร์ ฟิสิกส์พลังงานสูง

และฟิสิกส์รังสี (Weber, 2002: 35) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการประยุกต์ทางการสร้างภาพถ่ายทางการแพทย์ ที่ไม่สามารถใช้หัววัดรังสีประเภทสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector) หรือในรูปแบบฟิล์มทดแทนได้ เนื่องจากต้องการวัสดุตรวจรับรังสีในขนาดปริมาตรใหญ่ (Large volume) (Melcher, 2005: 6) คุณสมบัติสำคัญของวัสดุซินทิลเลเตอร์สำหรับรังสีเอ็กซ์ที่ดีจะต้องใส มีความเข้มแสงที่เปล่งออกมาแปรผันตรงกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ให้ผลผลิตทางแสง (Light yield) สูง มีการสลายตัวทางเวลา (Decay time) ที่เร็ว ทนต่อรังสี (Radiation hardness) ได้ดีและมีความหนาแน่นสูง (Van Eijk, 2001: 1) โดยทั่วไปวัสดุซินทิลเลเตอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาดส่วนมากจะอยู่ในรูปของผลึกเดี่ยว (Single crystal) และผลิตโดยใช้เครื่องปลูกผลึกเดี่ยวแบบต่าง ๆ ซึ่งในเมืองไทยยังไม่สามารถปลูกผลึกซินทิลเลเตอร์ได้เอง สมบัติที่ดีของผลึกเดี่ยวนี้คือมีความใส มีองค์ประกอบที่ชัดเจน (หากสัดส่วนของสารผิดไป ก็จะไม่เกิดเป็นผลึกเดี่ยว) และมีโครงสร้างผลึกที่เป็นเอกภาพ ทำให้มีสมบัติการเปล่งแสงที่ดี หากมีสารเจือ (Dopant) ที่เหมาะสม เช่น การเจือ Ce^{3+} ในผลึกซินทิลเลเตอร์ต่าง ๆ เป็นต้น (Weber, 2004: 9, Iltisa et al., 2006: 359 และ Fu et al., 2003: 335) ข้อเสียของผลึกซินทิลเลเตอร์ในรูปแบบผลึกเดี่ยวคือ มีราคาต้นทุนในการผลิตสูง ส่วนมากเป็นผลึกที่มีสมบัติดูดความชื้นสูง ต้องใช้ความระมัดระวังสูงในการดูแลรักษา และทำเป็นรูปร่างขนาดใหญ่ได้ยากมาก

วัสดุอีกประเภทหนึ่งที่มีความใสและง่ายต่อการสังเคราะห์ ได้แก่ วัสดุประเภทแก้ว (Glass) ซึ่งใช้กระบวนการเตรียมโดยวิธีหลอมและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (Melt-quenching technique) สามารถเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนของสารที่เป็นโครงสร้างแก้วแต่ละชนิดได้ และเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารเจือได้ง่ายอีกด้วย ทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ง่ายต่อการดูแลรักษา มีความทนต่อสภาพกรดและเบส ไม่ดูดความชื้น มีความทนต่อรังสีดี สามารถพัฒนาให้มีผลผลิตทางแสงและค่าสลายตัวทางเวลาที่ดีขึ้นมากในปัจจุบัน จึงได้รับความนิยมในการวิจัยและเตรียมแก้วเป็นวัสดุซิลทิลเลชันอย่างกว้างขวาง (Chewpraditkul et al., 2012: 1762, Fukabori et al., 2011: 910, Jiang et al., 2004: 323 และ Santiago et al., 2011: 1488) งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการเปล่งแสงและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีของแก้วยิตเตรียมซิลิโกบอเรตที่เจือ Dy_2O_3 ปริมาณความเข้มข้น 0.5 mol% เพื่อเป็นฐานข้อมูลทางวัสดุที่สำคัญในพัฒนาเป็นวัสดุซินทิลเลชันต่อไป

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การหลอมแก้ว

เตรียมส่วนผสมในการหลอมแก้วจากร้อยละโดยโมลของสารเคมีต่าง ๆ ในสูตร $10CaO : 25Y_2O_3 : 10SiO_2 : 54.5B_2O_3 : 0.5Dy_2O_3$ จากนั้นผสมสารเคมีทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันลงในเบ้าหลอมอะลูมินา (alumina crucible) และนำเข้าเตาหลอมไฟฟ้าโดยให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิ 1400 °C ค้างไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้สารประกอบหลอมเหลวเป็นเนื้อเดียวกันจะได้น้ำแก้วเหลว หลังจากนั้นเปิดฝาเตานำเอาเบ้าหลอมออกจากเตาเผาและเทน้ำแก้วเหลวลงในแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม ทิ้งไว้จนแก้วเริ่มแข็งตัวจึงนำแก้วออกจากแม่พิมพ์ และนำแก้วไปอบที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อแก้วเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติในด้านต่าง ๆ ของแก้ว

2.2 การวัดสมบัติทางแสง

วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล-เนียร์อินฟราเรด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visble-Near Infrared, UV-Vis-NIR) รุ่น UV 3600 ของบริษัท Shimadzu ที่ช่วงความยาวคลื่น 200–2,000 นาโนเมตร

2.3 การวัดการเปล่งแสง

วัดการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วจากสเปกตรัมการเปล่งแสง (Emission spectra) ของตัวอย่างแก้ว โดยให้ความยาวคลื่นสำหรับการกระตุ้น (Excitation wavelength) 351 นาโนเมตร ด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนต์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer ที่มีหลอดซีนอนเป็นแหล่งให้กำเนิดแสง

2.4 การวัดการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสี

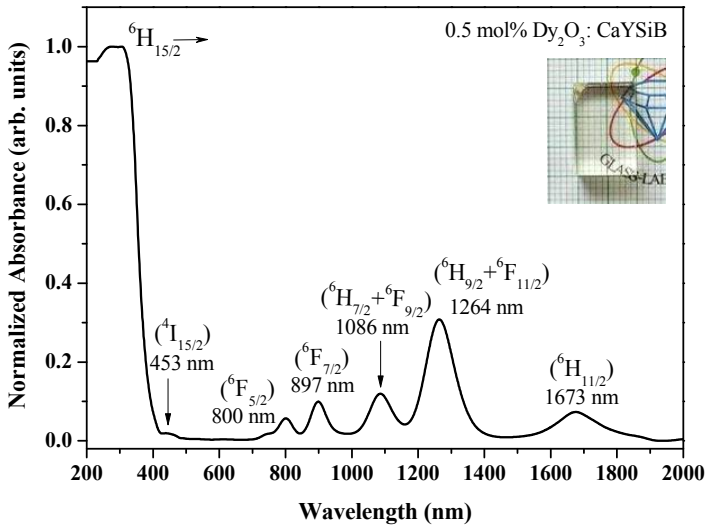
วัดการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีของตัวอย่างแก้ว ด้วยเป้าทองแดงเป็นตัวกำเนิดรังสีเอกซ์ (Cu target X-ray generator) จากเครื่อง X-ray induced optical luminescence แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จาก Inel , XRG3D-E : X-Ray generator และเส้นใยแก้วนำแสงถูกใช้ในการตรวจจับสเปกตรัมการเปล่งแสง ด้วยชุดสเปกโตรมิเตอร์จาก QE65 Pro, Ocean Optics วัดการเปล่งแสงจากแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ 50 keV และ 30 mA

2.5 การสลายตัวทางเวลา

การสลายตัวทางเวลาถูกวัดด้วยเครื่องฟลูออเรสเซนต์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer โดยให้ความยาวคลื่นสำหรับการกระตุ้น (Excitation wavelength) และความยาวคลื่นสำหรับการเปล่งแสง (Emission wavelength) ที่ 351 และ 575 นาโนเมตร ตามลำดับ

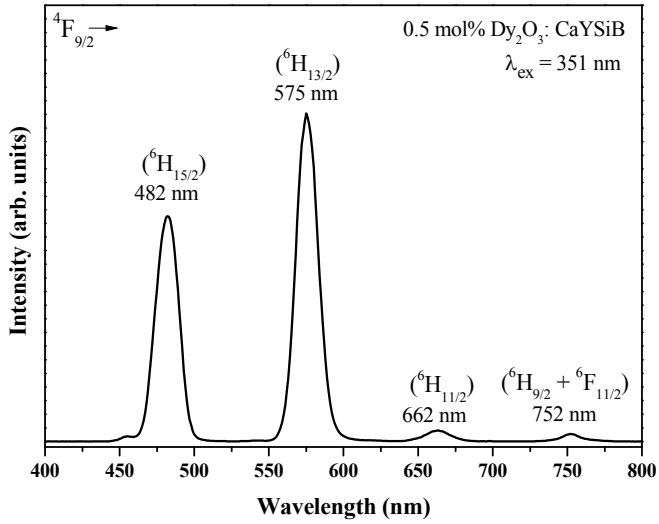
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วยิตเตรียมซิลิโกบอเรตที่เจือ 0.5 mol% Dy_2O_3 ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 2000 นาโนเมตร เครื่อง UV-Vis-NIR รุ่น UV 3600 จะได้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแก้ว ดังรูปภาพที่ 1 จากรูปภาพพบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแก้วมี 6 พีค คือที่ความยาวคลื่น 453, 800, 897, 1086, 1264 และ 1673 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนสถานะพลังงานจากสถานะพื้น $^6H_{15/2}$ ไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า $^4I_{15/2}$, $^6F_{5/2}$, $^6F_{7/2}$, $^6H_{7/2}$+$^6F_{9/2}$, $^6H_{9/2}$+$^6F_{11/2}$ และ $^6H_{11/2}$ ตามลำดับ (Li et al., 2007: 367 และ Lakshminarayana et al., 2009: 1169) ที่ความยาวคลื่น 1264 นาโนเมตร เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุดในช่วงอินฟราเรดใกล้

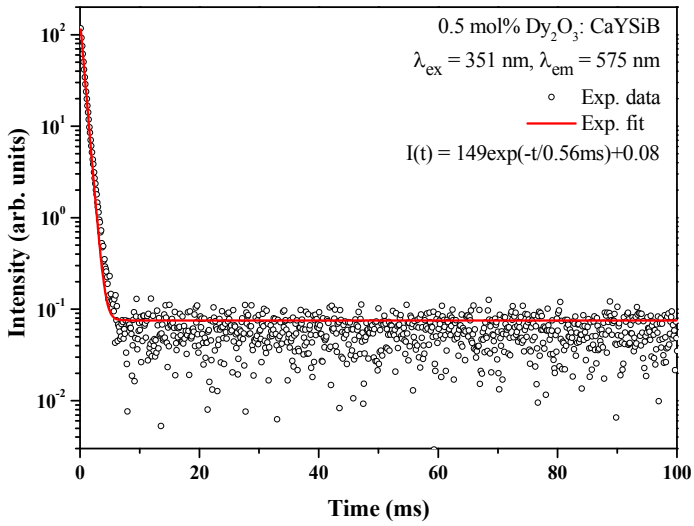


รูปภาพที่ 1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแก้วที่ความยาวคลื่น 200 - 2000 นาโนเมตร

สเปกตรัมสำหรับการเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 – 800 นาโนเมตร เมื่อถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนความยาวคลื่น (λ_{ex}) 351 นาโนเมตร แสดงดังรูปภาพที่ 2 พบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัมของการเปล่งแสงได้อย่างชัดเจนทั้งหมด 4 พีค ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นไปยังระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า คือ $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ (482 nm), $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ (575 nm), $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ (662 nm) และ $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{9/2} + {}^4F_{11/2}$ (752 nm) (Li et al., 2007: 367 และ Lakshminarayana et al., 2009: 1169) แสงขาวค่อนไปทางเหลืองของตัวอย่างแก้วนี้เนื่องมาจากการเปล่งแสงสีน้ำเงิน (482 nm; $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$) และสีเหลือง (575 nm; $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$) กับอัตราส่วนความเข้มของสัญญาณของช่วงสีเหลืองกับช่วงสีน้ำเงินเท่ากับ 1.4 อย่างไรก็ตามอัตราส่วนความเข้มของสัญญาณของสองช่วงการเปล่งแสงหลักนี้จะมีความแตกต่างกันตามโครงสร้างแก้ว (host) ที่แตกต่างกัน (Pattanaboonmee et al., 2015: 1) ภายใต้การถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนความยาวคลื่น 351 nm พลังงานการกระตุ้นคือการดูดกลืนผ่านการเปลี่ยนแปลงการถ่ายโอนประจุ (charge-transfer, CT) ของ Dy^{3+}–$O2^-$ จากนั้นจะถ่ายโอน Dy^{3+} แล้วปลดปล่อยพลังงาน (relax radiatively) จาก $^4F_{9/2}$ ไปยัง $^6H_{15/2}$ (575 nm สีน้ำเงิน) อย่างไรก็ตามการดูดกลืนพลังงานด้วยไอออน Dy^{3+} คือการดูดกลืนส่วนหนึ่งที่ไม่มีการเปล่งแสงออกมา เรียกว่า non-radiative relaxation

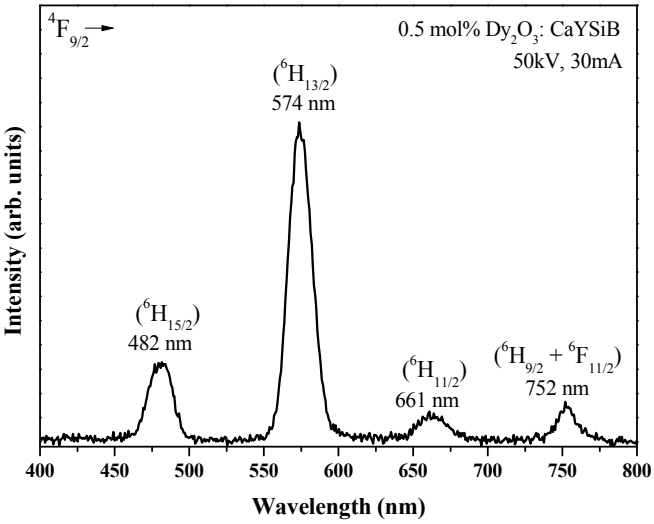


รูปภาพที่ 2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วที่ถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนความยาวคลื่น 351 nm



รูปภาพที่ 3 สเปกตรัมการสลายตัวทางเวลาของตัวอย่างแก้วที่ถูกกระตุ้นด้วยโฟตอน
และการเปล่งแสงโฟตอนความยาวคลื่น 351 และ 575 nm ตามลำดับ

สเปกตรัมการสลายตัวทางเวลาของพลังงานที่สถานะกระตุ้น $^4F_{9/2}$ ของ Dy^{3+} ถูกวัดสำหรับการเปล่งแสงโฟตอนความยาวคลื่น 575 nm แสดงได้ดังรูปภาพที่ 3 จากรูปค่าที่ได้จากการทดลองจะถูกปรับ (fitted) แบบเอกซ์โพเนนเชียลเป็นไปตามสมการ $I(t) = A_1 \exp(-t/\tau_1)$ + background เมื่อ A_1 และ τ_1 คือขนาดและเวลาในการสลายตัว ตามลำดับ การสลายตัวทางเวลาของตัวอย่างแก้วมีค่าเท่ากับ 0.56 ms



รูปภาพที่ 4 สเปกตรัมการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีของตัวอย่างแก้วที่ 50 keV และ 30 mA

สเปกตรัมการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีของตัวอย่างแก้วถูกวัดที่อุณหภูมิห้องจากรังสีเอกซ์ที่ได้จากเป้าทองแดง เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 50 keV และกระแสไฟฟ้าที่ 30 mA แสดงดังรูปภาพที่ 4 ตำแหน่งของพีคและรูปร่างของสเปกตรัมการเปล่งแสงและการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นด้วยรังสีมีความใกล้เคียงกัน การถ่ายเทความร้อนของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) หรือกระบวนการกระตุ้นภายใต้การกระตุ้นด้วยรังสีเอกซ์สามารถส่งผ่านพลังงานไปยังศูนย์กลางของ Dy^{3+} ได้โดยตรง หลังจากนั้นที่ระดับชั้น $^4F_{9/2}$ จะมีการปลดปล่อยไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการเปล่งแสงที่เกิดขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

ตัวอย่างแก้วยิตเตรียมซิลิโกบอเรต (CaYSiB) ที่เจือ Dy_2O_3 ปริมาณความเข้มข้น 0.5 ร้อยละโดยโมล ถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการหลอมและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว การเปล่งแสงของสีน้ำเงินและสีเหลืองที่เป็นการเปล่งแสงหลักของตัวอย่างแก้วสอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะกระตุ้นไปยังระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่า คือ $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ และ $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ ตามลำดับ ซึ่งการเปล่งทั้งสองนี้ได้รับทั้งจากการกระตุ้นด้วยแสง (PL) และการกระตุ้นด้วยรังสี (RL) สมบัติการเปล่งแสงของตัวอย่างแก้วนี้แสดงให้เห็นถึงการมีแนวโน้มของการเป็นวัสดุซินทิลเลชัน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับความร่วมมือและการสนับสนุนงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

6. เอกสารอ้างอิง

Van Eijk, C.W.E., 2001, “Inorganic-scintillator development”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Vol. 460, pp. 1-14.

Moszynski, M., 2003, “Inorganic scintillation detectors in γ-ray spectrometry”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Vol. 505pp. 101-110.

Weber, M.J., 2002, "Inorganic scintillators: Today and tomorrow", **Journal of Luminescence**, Vol. 100, pp. 35-45.

Melcher, C.L., 2005, "Perspectives on future development of new scintillators", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Vol. 537, pp. 6-14.

Weber, M.J., 2004, "scintillation: mechanisms and new crystals", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Vol. 527, pp. 9-14.

Iltisa, A., Mayhugh, M.R., Mengeb, P., Rozsab, C.M., Sellesc O., and Solovyev, V., 2006, "Lanthanum halide scintillators: Properties and Applications", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, Vol. 563, pp. 359-363.

Fu, J., Parker, J.M., Brown, R.M. and Flower, P.S., 2003, "Eu^{2+} ions in CaF_2-containing high Gd_2O_3 concentrations", **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 326&327, pp. 335–338.

Chewpraditkul, W., Shen, Y., Chen, D., Yu, B., Prusa, P., Nikl, M., Beitlerova and Wanarak, A.C., 2012, "Luminescence and scintillation of Ce^{3+}-doped high silica glass", **Optical Materials**, Vol. 34, pp. 1762–1766.

Fukabori, A., Yanagida, T., Chani, V., Moretti, F., Pejchal, J., Yokota, Y., Kawaguchi, N., Kamada, K., Watanabe, K., Murata, T., Arikawa, Y., Yamanoi, K., Shimizu, T., Sarukura, N., Nakai, M., Norimatsu, T., Azechi, H., Fujino, S., Yoshida, H. and Yoshikawa, A., 2011, "Optical and scintillation properties of Pr-doped Li-glass for neutron detection in inertial confinement fusion process", **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 357, pp. 910-914.

Jiang, C., Deng, P., Zhang, J. and Gan, F., 2004, "Radioluminescence of Ce^{3+}-doped B_2O_3–SiO_2–Gd_2O_3–BaO glass", **Physics Letters A**, Vol. 323, pp. 323-328.

Santiago, M., Marcazzó, J., Grasselli, C., Lavat, A., Molina, P., Spano, F. and Caselli, E., 2011, "Thermo- and radioluminescence of undoped and Dy-doped strontium borates prepared by sol-gel method", **Radiation Measurements**, Vol. 46, pp. 1488-1491.

Li, Y.Ch., Chang, Y.H., Lin, Y.F., Chang, Y.Sh., Lin, Y.J., 2007, "Synthesis and luminescent properties of Ln^{3+} (Eu^{3+}, Sm^{3+}, Dy^{3+})-doped lanthanum aluminum germanate $LaAlGe_2O_7$ phosphors", **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 439, pp. 367–375.

Lakshminarayana, G. and Qiu, J., 2009, "Photoluminescence of Pr^{3+}, Sm^{3+} and Dy^{3+}: SiO_2–Al_2O_3–LiF–GdF_3 glass ceramics and Sm^{3+}, Dy^{3+}: GeO_2–B_2O_3–ZnO–LaF_3 glasses", **Physica B**, Vol. 404, pp. 1169–1180.

Pattanaboonmee, N., Lertloypanyachai, P., Chewpraditkul, W., Liu, W., Chen, D., Babin, V., Beitlerova, A. and Nikl, M., 2015, Photo- and radioluminescence of Dy3+-doped oxide glass with high-Gd2O3 content, **Physica Status Solidi (A) - Applied Research**, pp. 1–6.