

สมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของแก้วซิงค์บิสมัทบอโรเทลลูไรท์ ที่เจือด้วยดิสโพรเซียมออกไซด์

Optical and Luminescence Properties of Zinc Bismuth Boro-tellurite Glasses Doped with Dysprosium Oxide

ภัทรวิจิ ยะสะกะ^{1,2*} ตะวัน จันทร์สุภาวณิช¹ หทัยกาญจน์ สมบัติ² และจักรพงษ์ แก้วขาว^{1,2}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*pyasaka@hotmail.com

บทคัดย่อ

ระบบแก้วซิงค์บิสมัทบอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยดิสโพรเซียมออกไซด์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียมออกไซด์ ตั้งแต่ 0.0, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล จากสูตร $(45-x)\text{TeO}_2 - 30 \text{B}_2\text{O}_3 - 15 \text{ZnO} - 10\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{Dy}_2\text{O}_3$ ด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิสูงและปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้วซิงค์บิสมัทบอโรเทลลูไรท์ พบว่า เมื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 2,500 นาโนเมตร ของแก้วระบบนี้ พบว่า ค่าความเข้มของพีการดูดกลืนแสงสูงขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียมออกไซด์ นอกจากนี้ได้ตรวจสอบคุณสมบัติการเปล่งแสงของ Dy^{3+} ที่เจือในระบบแก้วซิงค์บิสมัทบอโรเทลลูไรท์ จากการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 452 นาโนเมตร

คำสำคัญ: ซิงค์ออกไซด์ บิสมัทออกไซด์ แก้วบอโรเทลลูไรท์ ดิสโพรเซียมออกไซด์

Abstract

The zinc lithium bismuth glasses doped with Dy_2O_3 which varies dysprosium oxide concentration are 0.0, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0 and 1.5 mol% of the composition $(45-x)\text{TeO}_2 - 30 \text{B}_2\text{O}_3 - 15 \text{ZnO} - 10\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{Dy}_2\text{O}_3$ have been synthesized by conventional melt quenching technique. The optical and luminescence properties were investigated. The results shown that the optical absorption spectra of glasses were measured in the wavelength range of 200 – 2,500 nm. The intensity of all absorption bands increased with increasing Dy_2O_3 . In addition, the luminescence properties of Dy^{3+} dope zinc bismuth boro-tellurite glasses system were carried out using excitation wavelengths of 452 nm.

Keywords: zinc oxide, bismuth oxide, boro-tellurite glasses, dysprosium oxide

1. บทนำ

แก้วเทลลูไรท์ (tellurite) แก้วชนิดนี้มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติทางความร้อน ทางแสง และทางไฟฟ้า ได้ดี มีค่าดัชนีหักเหสูงและค่าคงที่ ไดอิเล็กทริกค่อนข้างสูง อีกทั้งมีค่าพลังงานโฟตอนที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วชนิดซิลิเกต และฟอสเฟต ค่าดัชนีหักเหสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอุปกรณ์ทางแสง เลเซอร์ อุปกรณ์ขยายสัญญาณและระบบโทรคมนาคม เพราะมีคุณสมบัติเป็น nonlinear optics หรือเรียกว่า nonlinear materials กล่าวคือเมื่อให้แสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่งผ่านแก้วเหล่านี้ แสงที่ผ่านออกมาจะมีความยาวคลื่นเปลี่ยนไปจากเดิมและพลังงานโฟตอนมีความสำคัญในการปรับปรุงและพัฒนาการส่งผ่านแสงในช่วงวิซิเบิลถึงอินฟราเรด (มีค่าสูงได้ถึง 6 ไมโครเมตร) และอัตราการสลายตัวของมัลติโฟนอนที่เจือด้วยกลุ่มไอออนของธาตุหายากจะมีค่าต่ำกว่าแก้วชนิดซิลิเกตและฟอสเฟต ปัจจุบันนี้แก้วเทลลูไรท์สามารถเป็นคู่แข่งที่สำคัญในการทำอุปกรณ์ส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่มีศักยภาพในช่วงความยาวคลื่นที่สามารถส่งข้อมูลหลาย ๆ ตัวไปในสายเดียวกันของระบบการสื่อสารข้อมูลสารสนเทศ [1]

บอเรท (B_2O_3) ถูกใช้เป็นส่วนผสมหลักทำหน้าที่เป็นโครงข่ายแก้ว (glass former) ที่สำคัญนอกเหนือจากแก้วซิลิกา และแก้วฟอสเฟส โดยยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่น่าสนใจ เนื่องจากมีการจับตัวกันของอะตอมโบรอนกับอะตอมออกซิเจนที่มีรูปแบบต่างกันไปส่งผลให้แก้วมีโครงสร้างที่หลากหลาย แก้วบอเรทเมื่อถูกหลอมเหลวจะมีความหนืดสูงและมีแนวโน้มการก่อตัวที่เป็นลักษณะผลึกในเนื้อแก้ว นอกจากนี้แก้วบอเรทที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ มีความสำคัญเป็นพิเศษ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อแสงทั้งที่เป็นเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น จึงทำให้แก้วบอเรทเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวิทยาศาสตร์ [2,3]

บิสมัทออกไซด์ (bismuth oxide) ได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมแก้ว เนื่องจากมีคุณสมบัติของแสงไม่เชิงเส้น นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้าน สวิตซ์ทางแสง เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูง และบิสมัทยังเป็นตัวเลือกที่ดีในการทำตัวแปลงสัญญาณทางแสง และเลเซอร์ อีกทั้งมีคุณสมบัติโพลาริซออิเล็กทรอนิกส์ที่ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สมบัติทางแสงที่เชิงเส้นและไม่เชิงเส้น เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติของแก้ว เช่น แก้วคริสตัลที่เกิดจากการเตรียมตะกั่วและกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ (PbO) ในเนื้อของแก้วเพื่อทำให้แก้วหนักขึ้น เนื้อแก้วยืดหยุ่นและแวววาว แต่ตะกั่วมีความเป็นพิษจึงมีการเติมออกไซด์ของแบเรียมและสังกะสี (BaO, ZnO) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ของตะกั่วสำหรับการใช้งานทางด้านกำบังรังสี [4]

ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น วัสดุเปล่งแสง และ เลเซอร์ไดโอด โดยอุปกรณ์เลเซอร์จะเปล่งแสงครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างในช่วงวิซิเบิล อีกทั้งมีแถบพลังงานที่กว้าง นอกจากนี้การเติมซิงค์ออกไซด์ลงในแก้วบอเรทจะช่วยเพิ่มความน่าสนใจในการทำเป็นผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ แก้วเหล่านี้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการติดตั้งจอพลาสมาที่มีการแสดงผล และคุณภาพสูง และซิงค์ออกไซด์ได้รับการยอมรับในการผลิตเป็นจอโทรทัศน์ และจอคอมพิวเตอร์. ซึ่งปรากฏในงานวิจัย [5,6] ที่ซิงค์ออกไซด์ $2+$ จะเข้าไปเชื่อมในโครงข่ายแก้วซิงค์ออกไซด์ สามารถสังเคราะห์โดยลักษณะโครงสร้างจะแตกต่างกับผลึกเชิงเดี่ยว ซิงค์ออกไซด์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น ฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ จะช่วยเพิ่มจำนวนของลักษณะรูปร่างในโครงข่าย ที่ใช้งานในเข็มขัดนาโน เส้นลวดนาโน และ แท่งนาโน ซิงค์ออกไซด์สามารถนำมาพัฒนาใช้ในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุนาโนเพราะมีเสถียรภาพทางกลสูงและยังนำมาทำเป็นอุปกรณ์เลเซอร์ [7]

ดิสโพรเทียม (dysprosium) เป็นหนึ่งในไอออนที่นิยมนำมาศึกษา เนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสงที่ดี คือ มีการเปล่งแสงในช่วง VIS และ NIR โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านแสงต่างๆ เช่น จอแสดงผล และเลเซอร์ทางแสง ไอออนของ Dy^{3+} มีการเปล่งแสงของสัญญาณเข้มสุด อยู่ที่ 2 พิก คือช่วงความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร (เปล่งแสงสีน้ำเงิน) และช่วงความยาวคลื่น 575 นาโนเมตร (เปล่งแสงสีเหลือง) โดยผลรวมของแสงสีน้ำเงินและแสงสีเหลือง เป็นแสงสีขาว ซึ่งแสงสีขาวนี้ได้รับความนิยมในช่วง VUV/UV และ NIR โดยปรากฏการเปล่งแสงของ Dy^{3+} มีการศึกษาในผลึกและแก้ว มีความต้องการผลิต

เป็น LED ชนิดแสงสีขาวยังเพื่อพัฒนาการใช้งานใช้หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์แบบเดิม เนื่องจากมีข้อดีในเรื่องของพลังงานและคุณสมบัติของวัสดุ [8]

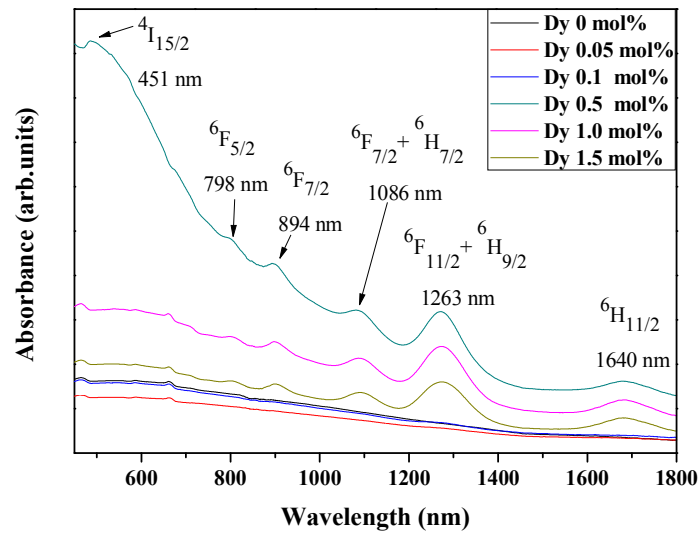
จากความสำคัญที่กล่าวมาข้างต้นนั้นทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของแก้วซิงค์บิสมาทอโร-เทลลูไรท์ที่เจือด้วยดิสโพรเซียมออกไซด์ เมื่อ ($x = 0.0, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0$ และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล ของ Dy_2O_3) โดยศึกษาสมบัติทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ ได้แก่ การดูดกลืนแสง และการลูมิเนสเซนซ์ของแสง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์แก้วในด้านต่าง ๆ ต่อไป

2. วิธีการทดลอง

แก้วซิงค์บิสมาทอโร-เทลลูไรท์ที่เจือด้วยดิสโพรเซียมออกไซด์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียมออกไซด์ ตั้งแต่ $0.0, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0$ และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล จากองค์ประกอบ $(45-x)TeO_2 - 30 B_2O_3 - 15ZnO - 10Bi_2O_3 - xDy_2O_3$ หลอมด้วยเทคนิคการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Melt Quenching Technique) ถูกเตรียมขึ้นจากสารเคมี ดังนี้ คือ $TeO_2, B_2O_3, ZnO, Bi_2O_3$ และ Dy_2O_3 ต่อมาทำการบดสารเคมีทั้งหมดให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกันด้วยโกร่งบดสาร จากนั้นคำนวณสารเคมีที่ใช้ในการหลอมแก้วเป็น 15 กรัม บรรจุในบ้าหลอมอะลูมินา และนำเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $1,150$ องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 1.5 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างแก้วที่ได้เข้าเตาอบ เพื่ออบไล่ความเครียดของแก้วที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง โดยปล่อยให้เย็นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง ขั้นตอนสุดท้ายของการเตรียมแก้วตัวอย่าง คือการนำไปตัดและขัดให้มีขนาด 1.0 ซม. \times 1.5 ซม. \times 0.3 ซม. สำหรับวิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสเนียร์ไออาร์สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น UV-3600 บริษัท Shimastu) การวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงโดยใช้เครื่อง Fluorescence Spectrophotometer (รุ่น Cary Eclipse บริษัท Agilent Technologies)

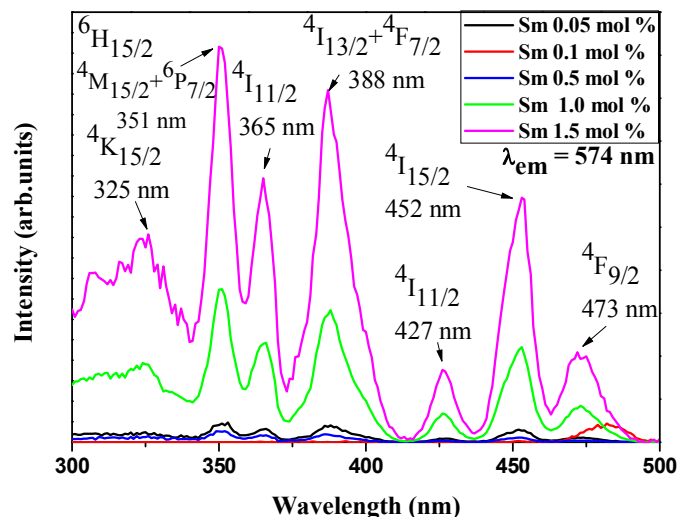
3. ผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วซิงค์บิสมาทอโร-เทลลูไรท์ที่เจือด้วยดิสโพรเซียมออกไซด์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียมออกไซด์ ตั้งแต่ 0.05 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล แสดงดังภาพที่ 1 พบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัมได้อย่างชัดเจนทั้งหมด 6 พีค โดยการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 451 นาโนเมตร ($^4I_{15/2}$) 798 นาโนเมตร ($^6F_{5/2}$) 894 นาโนเมตร ($^6F_{7/2}$) 1086 นาโนเมตร ($^6F_{9/2} + ^6H_{7/2}$) 1263 นาโนเมตร ($^6F_{11/2} + ^6H_{9/2}$) และ 1640 นาโนเมตร ($^6H_{11/2}$) สังเกตพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของแสงของแก้วตัวอย่าง ส่วนใหญ่เป็นการดูดกลืนในช่วงวิซิเบิลจนถึงช่วงอินฟราเรด โดยที่ความยาวคลื่น 400 ถึง 1800 นาโนเมตร



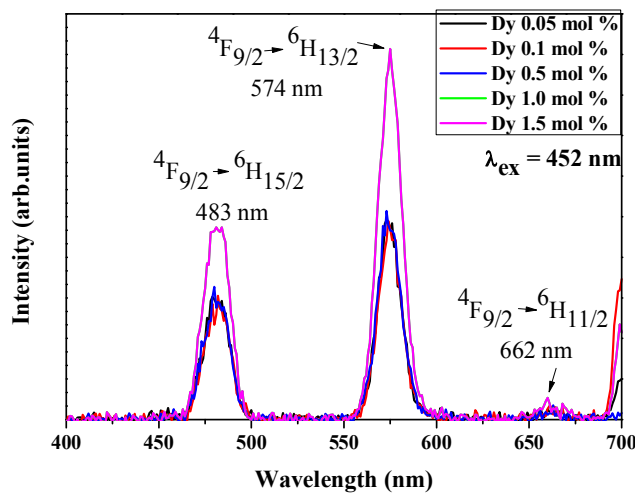
ภาพที่ 1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้ว $(45-x)\text{TeO}_2 - 30 \text{ B}_2\text{O}_3 - 15 \text{ ZnO} - 10\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{Dy}_2\text{O}_3$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ Dy^{3+} แตกต่างกัน

ผลจากการศึกษาสเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้วซึ่งมีสมบัติบอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยดิสโพรเซียมออกไซด์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของดิสโพรเซียมออกไซด์ ตั้งแต่ 0.05 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล สเปกตรัมการกระตุ้นถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่นแสดงดังภาพที่ 2 พบว่าสังเกตเห็นสเปกตรัมได้อย่างชัดเจนทั้งหมด 7 พีก โดยใช้การแปลงแสงที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร ซึ่งพีคการกระตุ้นของแสงเกิดการทรานซิชันของระดับพลังงานที่ตำแหน่ง 325 นาโนเมตร ($^4\text{K}_{15/2}$) 351 นาโนเมตร ($^6\text{M}_{15/2} \rightarrow ^6\text{P}_{7/2}$) 365 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{11/2}$) 388 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$) 427 นาโนเมตร ($^4\text{G}_{11/2}$) 452 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{15/2}$) และ 473 นาโนเมตร ($^4\text{F}_{9/2}$)

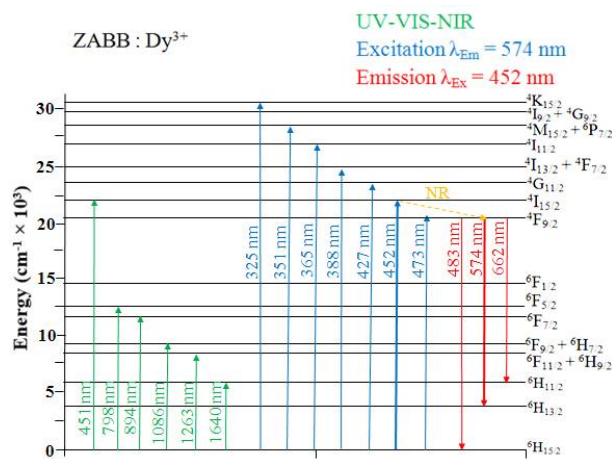


ภาพที่ 2 สเปกตรัมการกระตุ้นแสงของแก้ว $(45-x)\text{TeO}_2 - 30 \text{ B}_2\text{O}_3 - 15 \text{ ZnO} - 10\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{Dy}_2\text{O}_3$ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ Dy^{3+} แตกต่างกัน

ผลจากการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้วแก้วซิงค์บิสมัทบอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยดีสโพรเซียมออกไซด์ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกันของ Dy₂O₃ ตั้งแต่ 0.05 ถึง 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล สเปกตรัมการเปล่งแสงถูกบันทึกในช่วงความยาวคลื่น 451 ถึง 700 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น คือ 451 นาโนเมตร แหล่งกำเนิดของแสงคือ หลอดไฟแฟลช (xenon flash lamp) แสดงดังภาพที่ 1 จากภาพพบว่าสามารถสังเกตเห็นสเปกตรัมได้อย่างชัดเจนทั้งหมด 3 พีค ในช่วง VIS ถึง NIR โดยการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 483 นาโนเมตร (⁴F_{9/2} → ⁶H_{15/2}) 574 นาโนเมตร (⁴F_{9/2} → ⁶H_{13/2}) และ 662 นาโนเมตร (⁴F_{9/2} → ⁶H_{11/2}) สเปกตรัมการเปล่งแสงที่มีความเข้มของสัญญาณสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร (⁴F_{9/2} → ⁶H_{13/2}) โดยสอดคล้องกับภาพแบบระดับพลังงานของ Dy³⁺ ดังแสดงในภาพที่ 4 จากภาพจะแสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานไอออน Dy³⁺ ที่ถูกดูดกลืนแสง กระตุ้นแสง เปล่งแสง และ การปล่อยพลังงานในภาพของความร้อน (nonradiative) เมื่อไอออนของ Dy³⁺ ถูกกระตุ้นที่ระดับพลังงานต่างๆ จะเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากชั้น ⁴F_{9/2} ไปยังสถานะอื่นๆ



ภาพที่ 3 สเปกตรัมการเปล่งแสงของแก้ว (45-x)TeO₂ -30 B₂O₃ -15 ZnO -10Bi₂O₃ -xDy₂O₃ โดยทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ Dy³⁺ ต่างกัน



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมระดับพลังงานสำหรับการดูดกลืนแสง การกระตุ้นแสง และการเปล่งแสงของ Dy³⁺

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาแก้วชิงคิสมัทบอโรเทลลูไรท์ที่เจือด้วยดีสโพรเซียมออกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โมลโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแบเรียมออกไซด์ ตั้งแต่ 0.0, 0.05, 0.10, 0.5, 1.0 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โมล จากองค์ประกอบ $(45-x)\text{TeO}_2 - 30 \text{B}_2\text{O}_3 - 15 \text{ZnO} - 10\text{Bi}_2\text{O}_3 - x\text{Dy}_2\text{O}_3$ พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ปรากฏทั้งหมด 6 พีค โดยการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 451 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{15/2}$) 798 นาโนเมตร ($^6\text{F}_{5/2}$) 894 นาโนเมตร ($^6\text{F}_{7/2}$) 1086 นาโนเมตร ($^6\text{F}_{9/2} + ^6\text{H}_{7/2}$) 1263 นาโนเมตร ($^6\text{F}_{11/2} + ^6\text{H}_{9/2}$) และ 1640 นาโนเมตร ($^6\text{H}_{11/2}$) ซึ่งสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง ส่วนใหญ่ เป็นการดูดกลืนในช่วงวิซิเบิลจนถึงช่วงอินฟราเรด โดยที่ความยาวคลื่น 400 ถึง 1800 นาโนเมตร ผลสเปกตรัมการกระตุ้นแสงปรากฏทั้งหมด 7 พีค โดยใช้การเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร ซึ่งพีคการกระตุ้นของแสงเกิดการทรานซิชั่นของระดับพลังงานที่ 325 นาโนเมตร ($^4\text{K}_{15/2}$) 351 นาโนเมตร ($^6\text{M}_{15/2} \rightarrow ^6\text{P}_{7/2}$) 365 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{11/2}$) 388 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{F}_{7/2}$) 427 นาโนเมตร ($^4\text{G}_{11/2}$) 452 นาโนเมตร ($^4\text{I}_{15/2}$) และ 473 นาโนเมตร ($^4\text{F}_{9/2}$) ผลสเปกตรัมการเปล่งแสงปรากฏทั้งหมด 3 พีค ในช่วง VIS - NIR โดยการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่น ความยาวคลื่น 483 นาโนเมตร ($^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$) 574 นาโนเมตร ($^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$) และ 662 นาโนเมตร ($^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{11/2}$) สเปกตรัมการเปล่งแสงที่มีความเข้มของสัญญาณสูงสุดอยู่ที่ความยาวคลื่น 574 นาโนเมตร ($^4\text{F}_{9/2} \rightarrow ^6\text{H}_{13/2}$)

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่อำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในการวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

1. Raouf A.H. El-Mallawany.(2012) **Tellurite glasses**. Broken Sound Parkway
2. Mohapatra, S.D., 2009, FTIR Analysis of $\text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Bi}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ Glass System Doped with Nd_2O_3 , **Science Indexed**, Vol. 3, No. 5, pp. 11-18.
3. Becker, P., 1998, "Borate Materials in Nonlinear Optics", **Advance Materials**, Vol. 10, pp. 979-986
4. Dimitrov, V., and Komatsu, T., 2013, "Optical Basicity and Chemical Bonding of Bi_2O_3 Containing Glasses", **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 382, pp. 18-23.
5. Kumari, K.G., Begum, S.K.M., Krishna, Ch.R., Sathish, D.V., Murthy, P.N., Rao, P.S., and Ravikumar, R.V.S.S.N., 2012 "Physical and optical properties of Co^{2+} , Ni^{2+} doped $20\text{ZnO} + x\text{Li}_2\text{O} + (30 - X)\text{K}_2\text{O} + 50\text{B}_2\text{O}_3$ ($5 \leq x \leq 25$) glasses: Observation of mixed alkali effect" **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 47, pp. 2646-2650.
6. Ahmad, F., Hassan Aly, E., Atef, M., and ElOkr, M.M., 2014 "Study the influence of zinc oxide addition on cobalt doped alkaline earth borate glasses" **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 593, pp. 250-255.
7. Dimitrov, V., and Komatsu, T., 2013 "Optical basicity and chemical bonding of Bi_2O_3 containing glasses" **Journal of Non-Crystalline Solids** Vol. 382, pp.18-23.
8. Jayasankar, C.K., Venkatramu, V., Babu, S.S., and Babu, P., 2004 "Luminescence properties of Dy^{3+} ions in a variety of borate and fluoroborate glasses containing lithium, zinc, and lead" **Journal of Alloys and Compounds**, Vol. 374, pp. 22-26.