

دراسة مركز التألق Ce_2 في بلورة LYSO النقية والمشوبة بالسيريوم، عند الإثارة باستخدام ليزر 325 nm He-Cd ، مستمر في مجال درجات الحرارة المنخفضة

عبد العزيز زغبى⁽¹⁾

تاريخ الإيداع 2013/06/09

قبل للنشر في 2014/11/23

الملخص

دلت هذه الدراسة على وجود عصابات امتصاص تتعلق بالمراكز $Ce1$ في بلورة LYSO النقي والمشوب بالسيريوم وكذلك عصابات تألق تعود إلى المركز Ce_2 عند 480nm ، تزداد شدتها وتتوسع بشكل ملحوظ عند زيادة درجة الحرارة في بلورة LYSO: Ce نتيجة للتزاوج الإلكتروني الفونوني. التوزيع الفراغي لمراكز السيريوم والمصادر الإلكترونية (شواغر الأوكسجين) على مسافات قصيرة لتشكل معقدات العيوب، طاقة التنشيط قدرها 49meV ، عملية انطفاء تألق المركز Ce_2 في بلورة LYSO و LYSO:Ce تحدث عند $T > 140\text{K}$. تتشكل وتتوضع الأكسيتونات والثقوب STH, STE في بلورة LYSO:Ce في الجوار القريب لأيونات السيريوم وتشارك في عملية نقل الطاقة إلى المراكز Ce_2 في درجات الحرارة المنخفضة.

الكلمات المفتاحية: أطيايف التألق والامتصاص - المركز Ce_2 ، معقدات العيوب، التزاوج الإلكتروني الفونوني، عملية نقل الطاقة، الانطفاء الحراري للتألق، طاقة التنشيط. STH, STE.

⁽¹⁾ مدرس، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

The study of luminescence center Ce₂ in pure and cerium doped LYSO crystal using He – Cd laser 325nm continuous excitation in low temperature

Abdul-Aziz Zughbi⁽¹⁾

Received 09/06/2013

Accepted 23/11/2014

ABSTRACT

This study has shown Absorption bands related to Ce centers in LYSO pure and Ce doped and luminescence bands at 480nm intensity increase with temperature. The FWHM increases. Spatial distribution centers for Cerium centers and electronic traps (oxygen vacancies) at short distances to form complexes defects, energy activation 49meV, the process of Center quenching Ce₂ at, T>140K. STE and STH localized and formed nearby the cerium ions, and the energy transfer process to centers Ce₂.

Key words: Absorption and luminescence spectra-Center Ce₂, Complexes defects, Electron-phonon Coupling, The process of energy transfer, Thermal luminescence quenching, The activation energy.

⁽¹⁾Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

المقدمة

من المعروف أنّ بنية Orthosilicate LYSO، $(\text{Lu}_{(2-x)}\text{Y}_x \text{SiO}_5)$ هي عبارة عن رباعيات الوجوه Tetrahedral SiO_4 ، وهناك أوكسجين خامس غير رابط بالسيليكون يشكل بنية رباعي وجوه Ore_4 [1]، لذلك تشكل أيونات السيريوم مركزين مهمين أحدهما يدعى Ce1 المحاط بسبع ذرات أوكسجين والآخر يدعى Ce2 ويحاط بست ذرات أوكسجين وله بنية Octahedral [2] ولكن بسبب ظروف التنمية للبلورة يمكن أن تتشكل شواغر أوكسجين التي لها تأثير كبير في امتصاص وإصدار LYSO:Ce. تدل على ذلك أطياف Thermo Stimulated Luminescence (TSL) [3]. وكذلك تأثير التلدين في شدة إصدار البلورة حيث تتناقص شدة الإصدار عند التلدين في جو من الأوكسجين [4]. تمتص هذه البلورة أشعة X – Rays، ولكن بفعالية أقل من بلورة LSO. وذلك لأن أيونات الإيتريوم أخف من الليثيوم. تستبدل أيونات الليثيوم بأيونات الإيتريوم في البلورة LSO التي تختلف بنصف قطرها الأيوني Y^{+3} و Lu^{+3} ، [5]. يعزى الوميض الضوئي لبلورة LSO إلى الانتقالات الإلكترونية المسموحة في أيون Ce^{3+} إلى $5d \rightarrow 4f$ التي تتأثر بشدة بالحقل البلوري. اقترح Node استبدال أيونات مواقع الشبكة Ce^{3+} وكذلك المواقع بين العقد مستندا إلى أن انشطار السوية 4f يلاحظ في طيف الإصدار Ce1، في حين لم يلاحظ في Ce2 حتى في درجات الحرارة المنخفضة [6]، يلاحظ في بلورة LYSO الفقير بالإيتريوم نسبيا السلوك الوسطي بين LSO و YSO والسوية 5d يقع بالقرب من قاع عصابة الناقلية بمقدار 1-2 eV، وقد برهن على أن عمليات الأسر والتحرر الجارية للالكترونات الحرة تتم بعد تعريض العينة إلى الليزر النبضي 355nm، ومن ثم تعرضها مباشرة للضوء الأخضر والانتظار بعض دقائق وبعد أن ترصد إشارة مرحلية يجري استقبالها وتحليلها [7,8].

إن الهدف من هذا العمل هو إلقاء الضوء على تأثير شوائب Ce في بلورة LYSO من أجل دراسة عمليات الحركية المتعلقة بالمراكز والعيوب المتشكلة في هذه البلورة بالتحفيز بالإشابة بأيونات Ce وكذلك بالتحفيز الحراري، لذلك قيست أطياف الامتصاص والإصدار وتبعيتها لدرجة الحرارة وتأثير الإشابة بالسيريوم. ومن جهة أخرى هناك العديد من الدراسات التي تزودنا بمعلومات عن أنواع المراكز المتشكلة عند درجات الحرارة فوق RT بواسطة TSL ولكن لا توجد دراسات مشابهة في مجال درجات الحرارة منخفضة حول 15K، تؤكد نتائج قياسات رامان عند درجة الحرارة المنخفضة للبلورة $(\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_{0.20}\text{SiO}_5)$ [9,10]. وجود انزياح أحمر لعصابات رامان متعلق بتناقص حجم خلية الوحدة، وهو تابع لتركيز السيريوم في البلورة. من تحليل العدد الموجي المنخفض للأنماط وقياسات رامان المستقطبة يقترح الدور الاستبدالي لأيونات Ce لأيونات Re المشغولة بأيونات الإيتريوم [11,12].

طريقة التجربة

استخدمنا منظومة التألق الضوئي الموجودة في هيئة الطاقة الذرية للحصول على طيف التألق الضوئي، مصدر الإثارة الضوئية بليزر هيليوم - كاديوم (طول موجة الإثارة 325nm) عند درجات الحرارة المنخفضة في المجال (12-300K). وقد اختير عامل تنظيم مناسب عند رسم أطياف الامتصاص والعلاقة الحرارية للامتصاص.

مجموعة مرشحات - مبرد هليوم ذو دارة مغلقة - الضاغط - جهاز التحكم بالحرارة - المحلل الطيفي - جهاز المحلل الطيفي - الكواشف - مضخم طوري - برنامج قياس الطيوف - المعايرة: معايرة الشدة، معايرة طول الموجة. العينة المستخدمة بلورة تتغستات رصاص نقيه

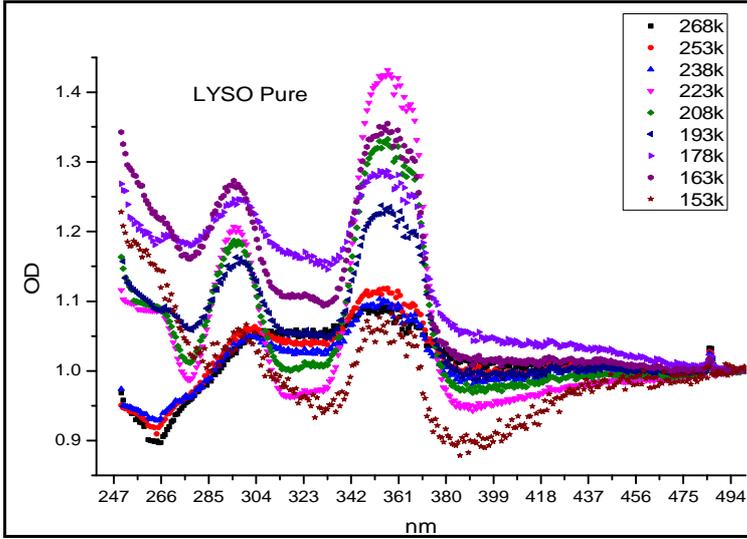
وُضعت عينة البلورة LYSO النقية على حامل من النحاس بواسطة لاصق Silver Best، ثم وضع حامل العينة داخل حجرة التبريد، وبعد إغلاق حجرة التبريد بإحكام تشغل وحدة الجلاء، ومن ثم تشغل وحدة التبريد والانتظار حتى تصل درجة الحرارة إلى 10K، وتقرأ درجة الحرارة عن طريق جهاز درجة الحرارة، ثم يشغل ويسلط الليزر على العينة بواسطة العدسات والمرشحات ويُجمع تآلق العينة بواسطة عدسات مجمعة، ثم يدخل هذا التألق إلى فتحة الموحد اللوني وتتحكم بالشدة الواردة على الكاشف بواسطة فتحة معايرة الشدة من قبلها.

استُخدمَ جهاز مطيافية الامتصاص الضوئي الموجود في هيئة الطاقة الذرية السورية لقياس طيف الامتصاص الضوئي عند درجات حرارة منخفضة في المجال (153-285K) وقد أخذ طيف الامتصاص للعينة بعد عدّ الطيف المرجعي baseline. يتكون الجهاز من الأجزاء الآتية: مصدر الضوء: عبارة عن ضوء ضمن المجال المرئي وفوق البنفسجي UV-Vis يصدر من Halogen lamp ولمبة ديتريوم D₂E-Lamp. الحجرة المبردة: استخدمت في هذا العمل حجرة مبردة بغاز الأزوت. تعدّ هذه الحجرة اللبننة الأساس لإجراء القياسات الضوئية المختلفة في درجات حرارة منخفضة. تتألف هذه الحجرة من الأجزاء الآتية. الأسطوانة المبردة: تتكون من حامل العينات البلورية الصلبة، ودارة التبريد: تتألف هذه الدارة من الأجزاء الآتية: وشيعة التبريد وأنابيب التوصيل، والمزدوجة الحرارية، وتعدّ عملية قياس الامتصاصية عند درجات الحرارة المنخفضة صعبة نتيجة لضعف درجة تخلية الحجرة من الهواء.

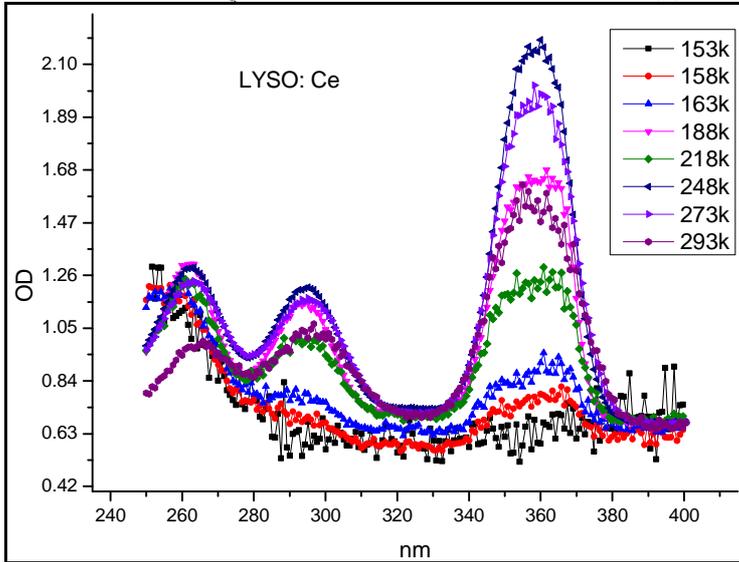
النتائج والمناقشة

إنّ أطياف الامتصاص التي تم الحصول عليها لبلورة $L_{2(1-x)}Y_xSiO_5$ (LYSO) الوحيدة، في المجال الطيفي 250-400nm (الشكل 1). الذي يبين وجود عصابتين للامتصاص. عصابة عند 357nm، والعصابة الثانية 295nm أما في البلورة LYSO:Ce المشوبة بالسيريوم، فيلاحظ وجود ثلاث عصابات للامتصاص في المناطق الطيفية

360nm, 295nm, 260nm (الشكل 2)، كما هو الحال في بلورة LYSO النقية. وهي تعود إلى المراكز Ce^{1+} [2,3].

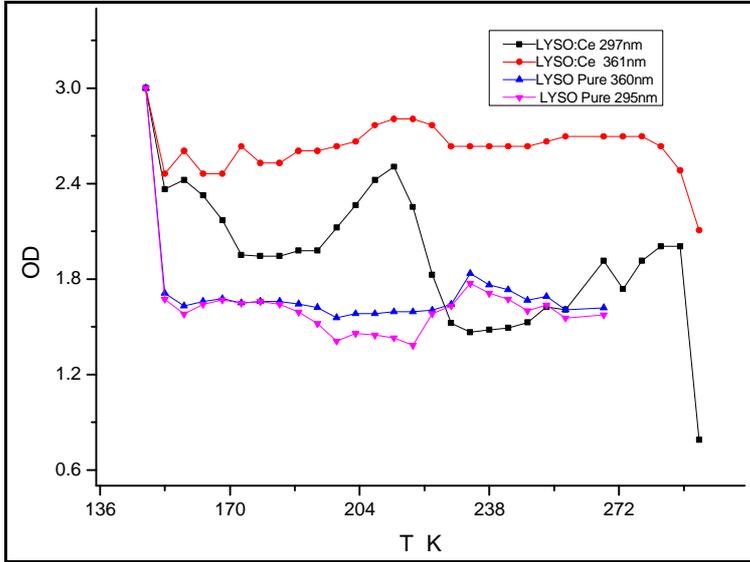


الشكل (1) تابعة أطيف الامتصاص لدرجة الحرارة في بلورة LYSO النقية.



الشكل (2) تابعة أطيف الامتصاص لدرجات الحرارة المنخفضة في بلورة LYSO:Ce المشوبة بالسيريوم.

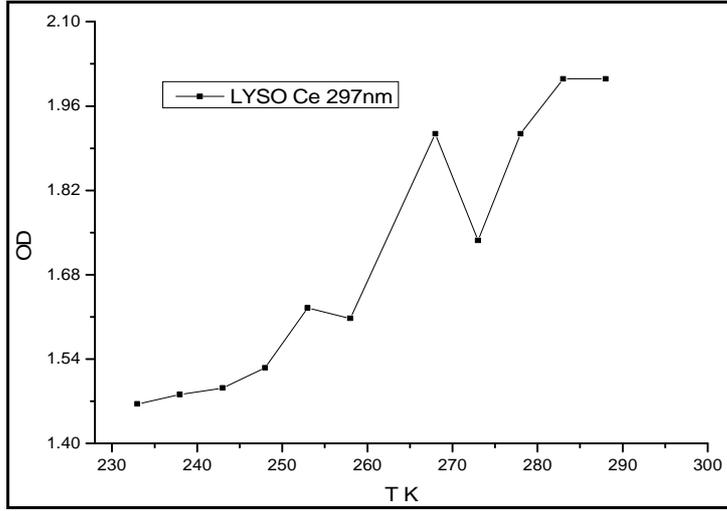
العلاقة الحرارية للامتصاصية معقدة ويلاحظ تغيرات في شدة الامتصاصية مع زيادة درجة الحرارة في المجال (153-293K) في بلورة LYSO:Ce (الشكل 3). ويلاحظ في كل من بلورات LYSO، النقية والمشوبة بالسيريوم. إذ نلاحظ التناقص في شدة الأمتصاص للبلورة النقية تقابله زيادة في الامتصاص للبلورة المشوبة بالسيريوم للعصابة 297nm والعصابة 261nm [3] التي تتأثر بتغير بدرجة الحرارة إلا أنه يلاحظ ارتفاع في شدة الامتصاصية عند درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة الغرفة.



الشكل (3) العلاقة الحرارية للامتصاصية لبلورة LYSO النقية والمشوبة بالسيريوم.

يجب علينا أن نتذكر أنه عند درجة حرارة الغرفة في بلورة LYSO: Ce وبلورة LSO النقية، تحدث عملية إعادة اتحاد نفقية محفزة حرارياً [20,21].

Thermally assisted tunneling recombination (TTR)، بين مصائد الإلكترونات (شواغر الأوكسجين) تأسر إلكترون. وبين مراكز الثقوب Ce^{+4} (أيون Ce^{+3} يأسر ثقب ويتحول إلى Ce^{+4}) التي تنتزع على مسافات قريبة وتشكل معقدات العيوب defect complex. هذه العمليات -على الأغلب- تجري باحتمال يتعلق أسياً بدرجة الحرارة الشكل (4).



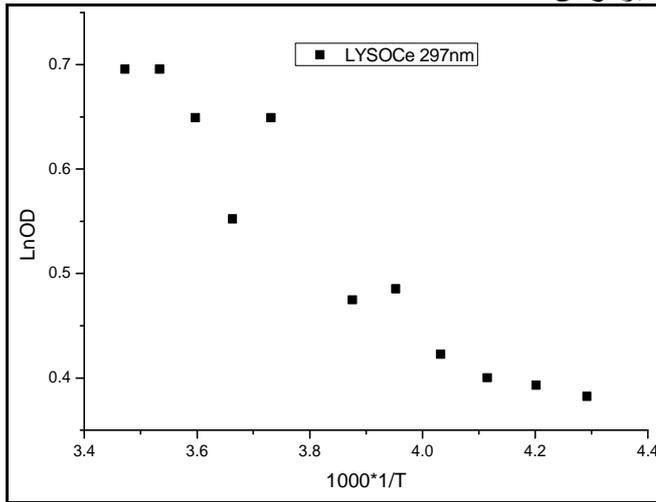
الشكل (4) العلاقة الحرارية للامتصاصية في المجال الحراري 230 – 300K.

ويتناسب مع تركيز المراكز أو الامتصاصية $n = n_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$ ، [14,15]، وقد

حُسبت طاقة التنشيط الموافقة لهذه العملية انظر الشكل (5). ($E_a = 49\text{meV}$) إذ:

n_0 : تركيز المراكز عند الدرجة الصفر.

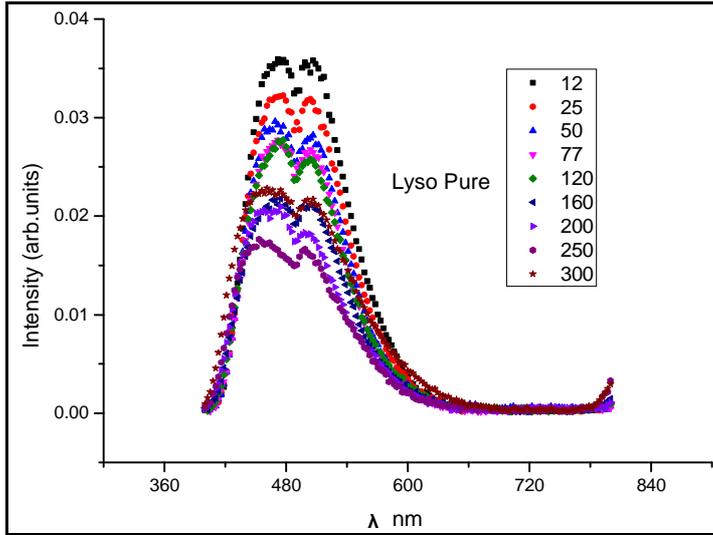
k_B : ثابت بولتزمان.



الشكل (5) العلاقة الحرارية للامتصاص في إحداثيات آرينوس.

الشكل (6، 7) يدل على وجود عصابة تآلق منشطرة تحت تأثير الحقل البلوري عند 490 – 480nm في بلورة LYSO النقي، وكذلك توجد عصابة إصدار عند المنطقة المذكورة نفسها في LYSO:Ce المشوب بالسيريوم ويفسر الإصدار الناجم في بلورات LYSO:Ce بالانتقال $5d \rightarrow 4f$ (انتقال ثنائي قطب) في أيون Ce الذي يتأثر بشدة الحقل البلوري، ويلاحظ وجود انشطار في هذه العصابات تحت تأثير ذلك الحقل لأن سويات $5d$ تتأثر بشدة بالحقل البلوري. نتيجة للتزاوج الإلكتروني – الفونوني. [13] EPC phElectron – Phonone Coupling

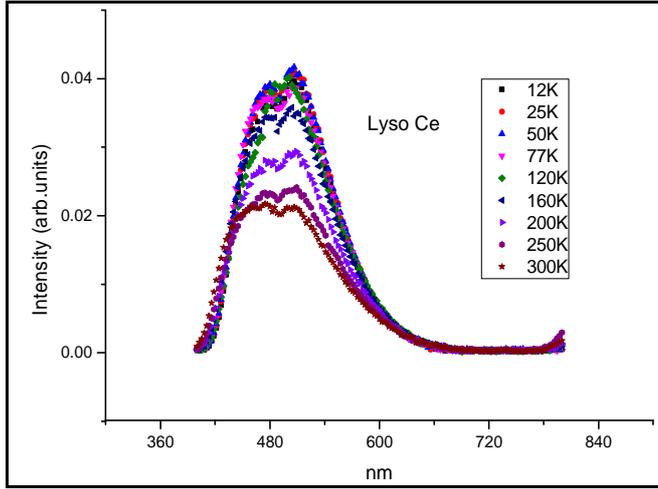
يؤدي إلى توسيع نصف عرض عصابة التآلق FWHM، وتلاحظ زيادة العرض مع زيادة درجة الحرارة، على خلاف ما أعلن عنه في [6] إذ FWHM تزداد ببطء كبير مع درجة الحرارة.



الشكل (6) تابعة أطيف التآلق لدرجة الحرارة لبلورة LYSO النقية.

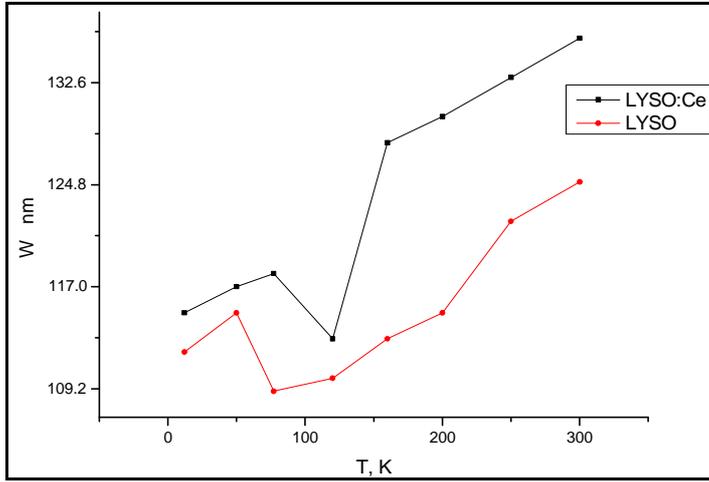
هذا العرض يزداد مع زيادة تركيز أيونات Ce وهذا ما يؤكد أن EPC للمراكز Ce_2 أقوى منه في Ce_1 ، قيمة FWHM لنتائجنا قرابة 100nm عند الدرجة 80K وهذه النتيجة تتطابق مع [13].

كما هو موضح على الشكل (8) بواسطة الإثارة بليزر (Cd-He، 325nm مستمر)، إلا أنه يلاحظ اضطراب في شكل عصابة الإصدار، عند زيادة درجة الحرارة في المجال 12– 300k.



الشكل (7) تابعة أطياف التآلق لدرجة الحرارة لبلورة LYSO:Ce المشوبة بالسيريوم.

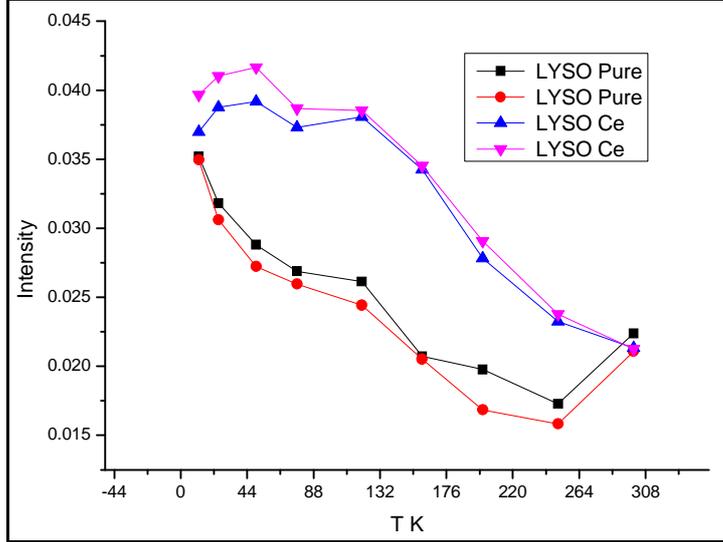
إذ يحدث تغير في تناظر الحقل البلوري الاهتزازي وتتزاح العصابة نحو الطاقة الأعلى مع زيادة درجة الحرارة، ويعزى سببه إلى تغير النمط الفونوني لاهتزاز الشبكة البلورية لأن السوية 4f، حساسة للفونونات [7].



الشكل (8) علاقة FWHM بدلالة درجة الحرارة في المجال 300K - 15.

العلاقة الحرارية للتآلق (الشكل 9) تبدو معقدة تدل على وجود ارتفاع في شدة التآلق في المجال الحراري 20-45K، وهذا يتفق مع [20، 21] الذي بدوره يؤكد حدوث عمليات نقل الطاقة إلى المراكز Ce²⁺. الأعمال [6، 13] تؤكد أن نقل الطاقة الذي يتعلق

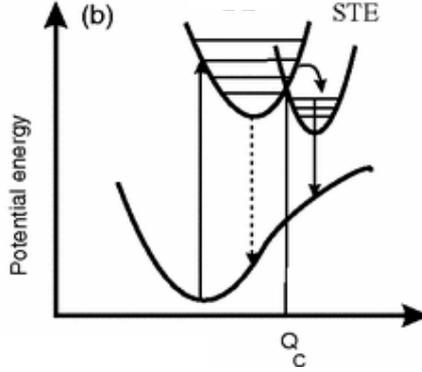
بدرجة الحرارة ومن المعروف أن هذه العملية تتم حتى في درجات الحرارة المنخفضة حيث تنقل طاقة الاكسيتون أو الثقب المأسور ذاتياً STE، Self Trapped Exciton و Self Trapped Hole ، STH إلى مراكز التألق. التي تبدي عصابات تألق ذاتية STE و 256nm و 315nm STH عند 9K بواسطة الإثارة بأشعة X [15، 16، 17] ولكن هذا يتناقض مع العمل [13] الذي يفيد بأن الأكسيتونات والثقب تنفك عند $T > 80K$ وهذا يتناقض مع نتائجنا عن زيادة شدة التألق في المجال 20-45k وللتخلص من هذا التناقض قمنا بالافتراض الآتي:



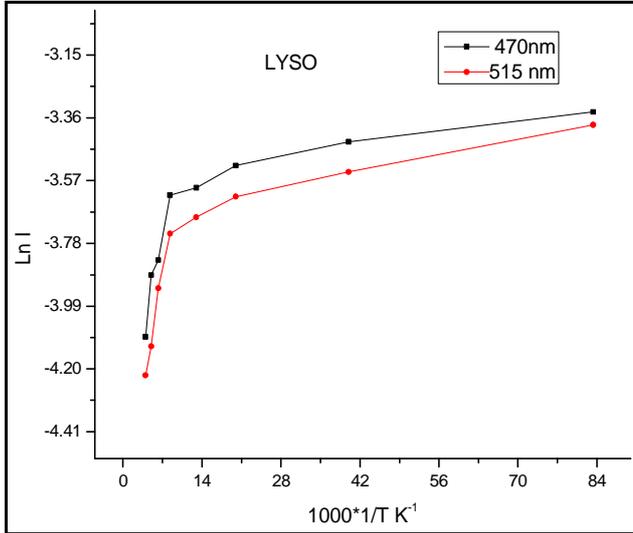
الشكل (9) علاقة الإصدار Ce_2 بدرجة الحرارة لبلورة LYSO النقية والمشوبة بالسيريوم المثارة بليزر Cd-He المستمر في المجال الحراري 20 - 310K.

لدى زيادة تركيز أيونات السيريوم في بلورة LYSO، الأكسيتونات والثقب المأسورة ذاتياً تتموضع في الجوار الأقرب لأيونات وتتم عملية نقل الطاقة إلى المركز Ce_2 بشكل مباشر وعند $T > 80K$ ، تبدأ الأكسيتونات والثقب المتموضعة بالحركة وتفقد تموضعها وتنفك. [15,16,18]، ويلاحظ هبوط في شدة التألق فوق 80K (الشكل 11). ولا سيما إذا علمنا أن مسألة تموضع (أسر) الثقب على أيون السيريوم محقق حتى في المجال الحراري فوق RT. نود أن نشير إلى أن التناظر الواضح في منحنى العلاقة الحرارية لشدة التألق للبلورتين النقية والمشوبة بالسيريوم (الشكل 9) تتفق تماماً مع شكل الإحداثيات التشاكلية Configuration Coordinate لمراكز التألق دون أدنى شك والتغير الحاصل في شكل العلاقة لبلورة LYSO المشوبة بالسيريوم يعكس شكل الإحداثيات التشاكلية

للاكسيتون المأسور ذاتياً (الشكل 10) الذي يعبر حاجزاً طاقياً ليتحول إلى حالة الأسر الذاتي STE، نشاهد عند $T=120K$ نقطة تحول واحدة لدى المنحنيين وهذا يعدُّ برهاناً واضحاً على تشكل أكسيتون أو ثقب مأسور ذاتياً STE, STH في درجات الحرارة المنخفضة، ويتفق مع [17,16,19]. أما في بلورة LYSO النقية حيث العلاقة الحرارية لشدة التألق فتعكس علاقة الانطفاء الحراري للمركز Ce^{2+} وتخضع لقانون Mott عند درجات حرارة $T > 125K$.

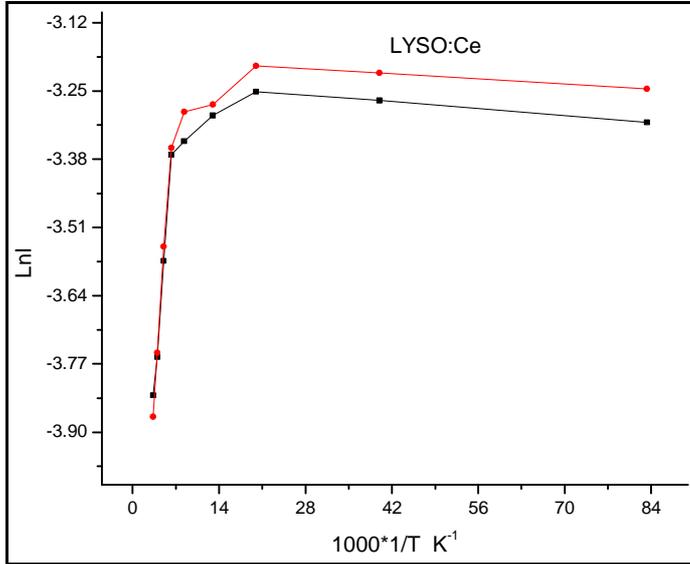


الشكل (10) الإحداثيات التشاكلية واجتياز الحاجز الطاقى لتشكل STE.



الشكل (11) العلاقة الحرارية لشدة التألق في إحداثيات اربنوس لبلورة LYSO.

الشكل (11، 12) بطاقة تنشيط 141meV من أجل LYSO:Ce و 6meV من أجل LYSO النقي، ويلاحظ اضطراب في المنحني المرسوم في إحداثيات أرينوس (LnI Vs 1000/T, K⁻¹) عند T=93K، يعتقد أنها توافق عملية بدء حركية STE و STH في البلورة.



الشكل (12) العلاقة الحرارية لشدة التآلق في إحداثيات أرينوس لبلورة LYSO:Ce.

الخلاصة

تؤكد التجارب المبينة للقياسات الطيفية وجود نوعين من مراكز السيريوم Ce1 و Ce2 في بلورة LYSO النقية والمشوبة بالسيريوم الذي يشير إلى وجود قمم في أطياف الامتصاص والتآلق. أما تأثير شوائب السيريوم في تشكل هذه المراكز في مجال درجات الحرارة T>230K، فيؤدي إلى زيادة التأثير المتبادل بين هذه المراكز لتشكيل تجمعات معقدات العيوب (بطاقة تنشيط 49meV) تتوزع في مسافات قريبة ومهيئة لعملية اتحاد نفقية. في مجال درجات الحرارة 15- 80 K تتموضع الثقوب والأكسيتونات STE, STH في الجوار القريب من أيونات السيريوم لنقل الطاقة وعند درجة حرارة أكبر من 80K تتوقف هذه العملية، وتبدأ الثقوب والأكسيتونات بالحركة والتفكك يخضع الانطفاء الحراري للمركز Ce2 لقانون Mott عند درجات حرارة فوق 140K. ويدل على تشكل STE, STH.

REFERENCES

1. Zhou, W. Yang, J. Wang, J. Li, Y. Kuang, X. Tang, J. and Liang, H. 2012. Study on the effects of 5d energy locations of Ce³⁺ ions on NIR quantum cutting process in Y₂SiO₅: Ce³⁺, Yb³⁺, Vol. 20, No.S4/OPTICS EXPRESS A511.
2. Ioannis, S. Kandarakis, I. George, S. Panayiotakis, Y. Zorenko, P. Gorbenko, V. Savchyn, V. Voznyak, T. Grinyov, B. Sidletskiy, O. Kurtsev, D. Fedorov, A. Baumer, V. Nikl, M. Mares, J. Beitlerova, A. Prusa, P. and Kucera, P., 2011. Growth and luminescent properties of Lu₂SiO₅:Ce and (Lu_{1-x}Gd_x)₂SiO₅:Ce single crystalline films. Journal of Crystal Growth 337: 72–80.
3. Blahuta, S. Bessière, A. Viana, B. Ouspenski, V. Mattmann, E. Lejay, J. and Gourier, D. 2011. Defects Identification and Effects of Annealing on Lu_{2(1-x)}Y_{2x}SiO₅ (LYSO) Single Crystals for Scintillation Application. *Materials*.
4. Yang, K. Melcher, L. Rack, D. Eriksson, L. 2009. Effects of calcium codoping on charge traps in LSO:Ce crystals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2009, 56, 2960-2965.
5. Feng, H. Jary, V. Mihokova, E. Ding, D. Nikl, M. 2010. Temperature dependence of luminescence characteristics of Lu_(2-x)Y_xSiO₅:Ce³⁺ scintillator grown by the Czochralski method, Journal of applied physics 108, 033519.
6. Yang, K. Melcher, L. Rack, D. Eriksson, L., 2009. Effects of calcium codoping on charge traps in LSO:Ce crystals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 56, 2960-2965.
7. Ende, B. Aarts, L. and Meijerink, A. 2009. "Lanthanide ions as spectral converters for solar cells," *Phys Chem. Chem. Phys.* 11(47), 11081–11095.
8. Valais, G. Michail, C. David, S. Dionisis, A. and Cavouras, D., 2008. Luminescence Emission Properties of (Lu; Y)₂SiO₅:Ce (LYSO:Ce) and (Lu; Y)AlO₃:Ce (LuYAP:Ce) Single Crystal Scintillators Under Medical Imaging Conditions. *Ieee transactions on nuclear science*, vol. 55, no.2, april.
9. Ricci, P. Carbonaro, C. Chiriu, D. Corpino, R. Faedda, N. 2008. Ce³⁺-doped lutetium yttrium orthosilicate crystals: Structural characterization. *Materials Science and Engineering B* 146.
10. Valais, I. Michail, C. David, S. Nomicos, D. Panayiotakis, G. Kandarakis, I. 2008. A comparative study of the luminescence properties of LYSO:Ce, LSO:Ce, GSO:Ce and BGO single crystal scintillators for use in medical X-ray imaging. *Physica Medica.* 24, 122-125
11. Mao, R. Zhang, L. and Zhu, R. 2008. Emission Spectra of LSO and LYSO Crystals Excited by UV Light, X-Ray and γ -ray. *Ieee transactions on nuclear science*, vol. 55, no. 3.
12. Loudyi, H. Guyot, Y. con, J. drini, C. Joubert, M. 2007. Understanding the scintillation efficiency of cerium-doped LYSO, YSO crystals from microwave study of photoconductivity and trapping. *Optical Materials* 30:26–29.

13. Yang, K. Melcher, L. Rack, D. Eriksson, L. 2009. Effects of calcium codoping on charge traps in LSO:Ce crystals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 56, 2960-2965.
14. GoÈ, W. Johnson, N. BourP, McCluskeyM. D., and Haller, E. E. (1996). *Appl. Phys. Lett.* 69.
15. Borg, R. J. and Dienes G. J. 1988. An Introduction to Solid state Diffusion. Academic press, Publishers Boston-san Diego-NewYork.
16. Lukasiewicz, Z. T. and Kisielewski, J. 2006. Scintillation properties of selected oxide monocrystals activated with Ce and Pr. *Optical Materials* 28:85–93.
17. Liu Bo, Mu. Zeming Gu, Qi. Chaoshu, Shi, Min. Guohao, Yin, Ren. 2007. Laser – excited spectra of $Lu_2SiO_5:Ce$ Scintillator. *J of Luminescence*.
18. Dongzhou, Ding. Bo Liu, Yuntao Wu. Jianhua Yang, Guohao Ren. Junfeng, Chen. 2014. Effect of yttrium on electron – phonon coupling strength of 5d state of Y^{3+} ion in $LYSO:Ce$ Crystals. *J of Luminescence*.
19. Cooke, D. W. Muenchausen, Bennett, R. E. B. L. McClellan, Portis. K. J. A. M. 1998. Temperature – dependent luminescence of cerium – doped ytterbium oxyorthosilicate. *J of Luminescence*.
20. Vedda, A. Martini, Meinardi, M. F. 2000. Tunnelling process in thermally stimulated luminescence of mixed $Lu_xY_{1-x}AlO_3:Ce$ Crystals. J. Chval, M. Dusek, J. A. Mares, E. Mihokova, and M. Nikle., *Phys. Rev. B* 61, 8081.
21. Vedda, A. Fasoli, M. V. V. Laguta, E. Mihokova, J. Pejchal, A. Yoshikawa, and M. Zhuravleva. 2009. Trap – center recombination processes by rare earth activators in $YAlO_3$ single crystal host. *Phys. Rev. B* 80, 045113.