



تصویربرداری یونولومینسانس در فشار هوا: ابزاری جهت مطالعه نمونه‌های گسیلنده لومینسانس

نیکبخت، طاهره* - یداله‌زاده، بهزاد - زحمتکش اصفهانی، میثم

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها

چکیده:

تصویربرداری یونولومینسانس با استفاده از باریکه یونی در فشار اتمسفر، روشی نویدبخش برای مطالعه غیر مخرب نمونه‌های گسیلنده لومینسانس است که در آن امکان انتخاب دقیق محل تصویربرداری وجود دارد و تصویر نمونه با حساسیت و سرعت زیاد ثبت می‌شود. این روش امکان مطالعه نمونه‌های ارزشمند و تاریخی، و همچنین نمونه‌های بزرگ و حساس به خلاء را فراهم می‌کند. بنابراین، چیدمان آزمایش تصویربرداری یونولومینسانس در فشار هوا در آزمایشگاه واندوگراف راه‌اندازی و تصاویر نمونه‌های نوعی فلوریت و اسفالریت توسط آن ثبت شد. نتایج بدست آمده بیانگر کارایی و حساسیت این روش تصویربرداری در زمینه مطالعه نمونه‌های گسیلنده لومینسانس است.

کلمات کلیدی: یونولومینسانس، تصویربرداری، باریکه یونی

مقدمه:

استفاده از باریکه الکترونی و اگر جهت تصویربرداری از نمونه‌های گسیلنده لومینسانس روشی بسیار متداول جهت مطالعه ساختار آن‌ها به شمار می‌رود [۱]. در این روش لایه‌های نازکی از نمونه در خلاء قرار داده می‌شود و پس از برخورد باریکه الکترونی با انرژی از مرتبه 10 keV با آن، تصویر لومینسانس ساطع شده از نمونه ثبت می‌شود. استفاده از این روش منجر به کسب اطلاعات ارزشمندی از نمونه‌های گسیلنده لومینسانس می‌شود. با این وجود برای این روش محدودیت‌هایی نیز وجود دارد که شامل عمق نفوذ کم الکترون‌ها و بنابراین ضرورت انجام آزمایش در محیط خلاء می‌شود.

پدیده یونولومینسانس شامل گسیل لومینسانس القایی توسط باریکه یونی فرودی بر نمونه، می‌شود. این پدیده اساس روش تصویربرداری یونولومینسانس [۲] را تشکیل می‌دهد که شباهت بسیاری با کاتدولومینسانس دارد. عمق نفوذ یون‌های نوعی به کار گرفته شده در این روش در حدود $150 \mu\text{m}$ است. بنابراین در مقایسه با روش کاتدولومینسانس، تصاویر بدست آمده در این روش حاوی اطلاعات متفاوتی از نمونه‌ها هستند [۳]. همچنین امکان به کارگیری این روش تصویربرداری در فشار اتمسفر نیز وجود دارد، بنابراین بدون نیاز به انجام فرآیندهای مخرب نمونه‌سازی و یا پوشش‌دهی رسانای آن‌ها، امکان مطالعه نمونه‌های ارزشمند و باستانی و همچنین نمونه‌های بزرگ و حساس به خلاء فراهم می‌آید.



همچنین تصویربرداری از تعداد زیادی از نمونه‌ها در زمان کوتاه امکان‌پذیر می‌شود. در این روش تصاویری با ابعاد حدود $2 \times 2 \text{ mm}^2$ از نمونه در زمان‌های کمتر از یک دقیقه بدست می‌آیند و بنابراین نمونه در معرض دُز تابشی زیاد قرار نمی‌گیرد.

با وجود پتانسیل‌های بالای روش تصویربرداری یونولومینسانس در فشار اتمسفر، تا جایی که اطلاع داریم، تاکنون تنها در یکی دو مرکز باریکه یونی در سطح دنیا امکان استفاده از آن فراهم آمده است [۴]. بنابراین کارایی‌ها و توانمندی‌های این روش تا حد زیادی کشف نشده باقی مانده است. این در حالی است که تجهیزات مورد نیاز برای انجام این روش نسبتاً ارزان و در دسترس هستند. در این کار پژوهشی ضمن شرح کلی چیدمان راه‌اندازی شده جهت به کارگیری این روش تصویربرداری در آزمایشگاه اوندوگراف، نتایج حاصل از آن برای کانی‌های فلوریت و اسفالریت، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

روش کار :

قطعات کوچکی از کانی‌های فلوریت و اسفالریت برای بررسی توسط این روش تصویربرداری انتخاب شدند (شکل ۱). جهت افزایش دقت تصاویر یونولومینسانس، در صورت لزوم نمونه‌ها در ترکیب مناسبی از رزین و سخت‌کننده ثابت شده و سپس سطح آن‌ها توسط سنباده‌های با اندازه دانه‌های به ترتیب از بزرگ به کوچک صیقل داده شد و در ادامه با استفاده از خمیر الماسه و پودر آلومینا، تا ابعاد میکرومتری هموار شدند.



(ب)

(الف)

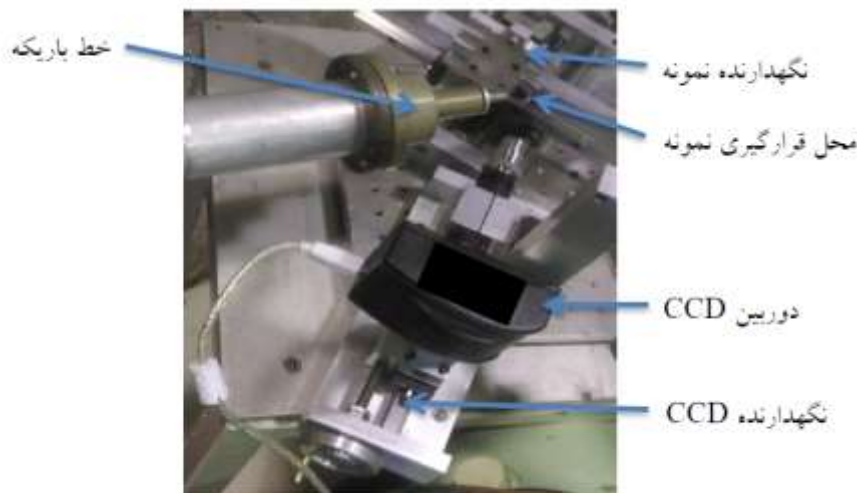
شکل شماره (۱) تصویر نمونه‌های صیقل داده شده فلوریت (الف) و اسفالریت (ب).

جهت تصویربرداری از نمونه‌ها، از یک دوربین CCD با رزولوشن ۵ مگاپیکسل استفاده شد. با توجه به موارد کارکرد این نوع دوربین‌ها، که جهت استفاده روی میکروسکوپ‌های اپتیکی طراحی شده‌اند، در حالت عادی امکان استفاده مستقل از آن‌ها جهت تصویربرداری مستقیم از نمونه‌ها وجود ندارد. بنابراین جهت رفع این محدودیت، از عدسی شیئی میکروسکوپ با بزرگنمایی مناسب در مقابل دوربین استفاده شد. در این حالت امکان تصویربرداری از اجسام نورانی

۱. Charged Coupled Device

کوچک توسط CCD فراهم می‌شود. جهت ثبت تصاویر با وضوح مناسب، لازم است نویز نوری محیط حذف و آزمایش در فضای تاریک انجام شود.

باریکه پروتون با انرژی ۲ MeV و جریان چند نانو آمپر، پس از عبور از پنجره نگهدارنده خلاء کپتون^۲ به نمونه که در فاصله حدود ۱ cm از محل خروج باریکه قرار می‌گیرد، برخورد می‌کند. جهت سهولت آنالیز تصاویر یونولومینسانس، نمونه‌ها در زاویه ۴۵ درجه نسبت به راستای فرود باریکه قرار داده می‌شوند، به نحوی که خط عمود بر سطح آن‌ها در راستای عمود بر سطح عدسی دوربین واقع شود. در این حالت با استفاده از نگهدارنده دوربین، محل آن طوری تنظیم می‌شود که محل برخورد باریکه به نمونه درست در کانون دوربین قرار گیرد و تصاویر روی رایانه دارای بیشترین وضوح باشند. در این شرایط، تنظیم هندسه مناسب و تصویربرداری از هر نمونه حدود یک دقیقه طول می‌کشد. در شکل ۲ تصویری از چیدمان آزمایش نشان داده شده است.



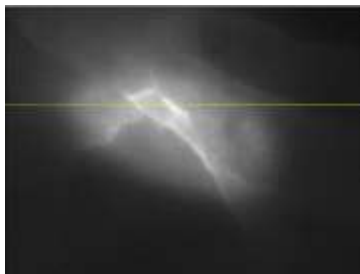
شکل شماره (۲) تصویری از چیدمان آزمایش تصویربرداری یونولومینسانس. مکان تجهیزات مورد استفاده در شکل مشخص شده است.

در نهایت تصاویر بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار ImageJ تحلیل شدند تا اطلاعات ساختاری نمونه‌ها بدست آید.
نتایج :

^۲. Kapton

به طور کلی در تحلیل تصاویر لومینسانس نمونه‌ها، اطلاعات اصلی با توجه به نحوه توزیع رنگ‌ها در تصاویر استخراج می‌شوند. به این ترتیب که نواحی با نوع و شدت رنگ متفاوت، بیانگر میزان غلظت مراکز گسیلنده لومینسانس، درجه شفافیت و حضور عوامل خاموش کننده در نمونه هستند. بنابراین جهت دستیابی به اطلاعات دقیق، شناسایی رنگ‌ها با استفاده از نرم‌افزار مناسب ضروری است.

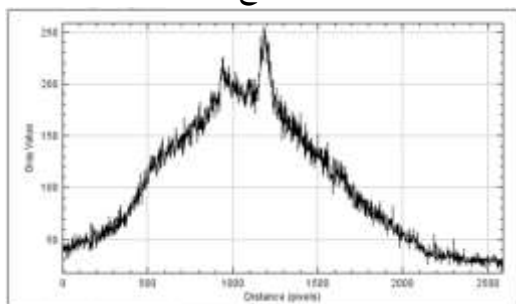
در شکل ۳ (الف) تصویر یونولومینسانس نمونه فلوریت نشان داده شده است. در این تصویر ساختار نواقص و گسستگی‌های موجود در سطح نمونه، به طور واضح قابل مشاهده است. همان گونه که انتظار می‌رود مراکز گسیل لومینسانس در محل حضور نواقص بیشترین تراکم را دارند. در شکل ۳ (ب) هیستوگرام قرمز-سبز-آبی تصویر یونولومینسانس نمونه نشان داده شده است. حضور دو قله تفکیک شده در نمودار رنگ سبز نشان دهنده وجود ساختارهای متفاوت موجود در نمونه است. در منحنی توزیع شدت نسبی لومینسانس گسیلی در امتداد خط زرد رنگ روی تصویر مربوط به مؤلفه سبز تصویر اولیه (شکل ۳ (ج))، قله‌های تیز مربوط به ساختار شکاف‌های روی نمونه به وضوح قابل مشاهده هستند (شکل ۳ (د)).



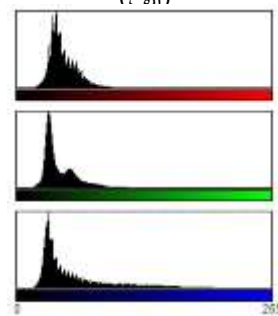
(ج)



(الف)
(a, b, c)



(د)



(ب)



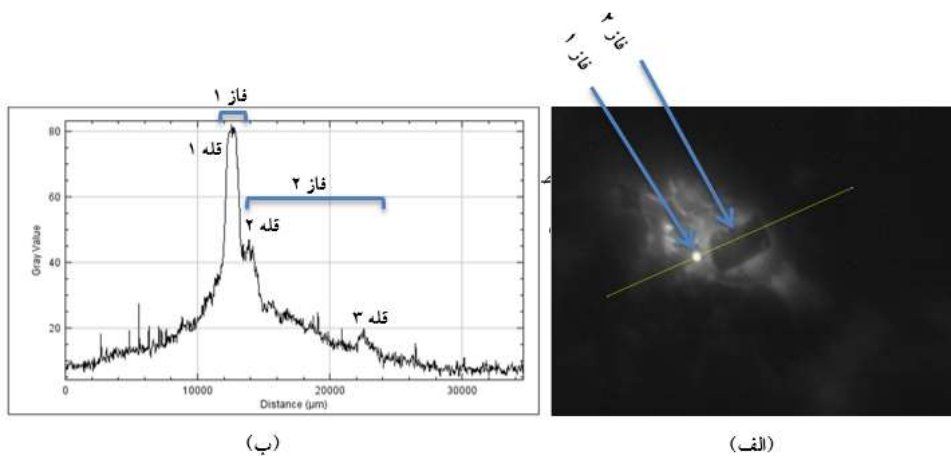
شکل شماره (۳) تصویر یونولومینسانس نمونه فلوریت (با ابعاد حدود $2 \times 3 \text{ mm}^2$) (الف)، هیستوگرام مربوط به نحوه توزیع رنگ-های قرمز-سبز-آبی در آن (ب)، مؤلفه سبز رنگ تصویر اولیه (ج)، و نمودار مربوط به نمایه شدت این مؤلفه در امتداد خط زرد رنگ (د).

در شکل ۴ تصاویر یونولومینسانس مربوط به سه ناحیه مختلف روی نمونه اسفالریت نشان داده شده است. از نظر رنگ، نواحی با رنگ‌های مختلف سبز، قرمز و سیاه در تصاویر دیده می‌شوند که نماینده فازهای مختلف موجود در نمونه هستند. همچنین ساختارهای منظم مربوط به فازهای نمونه با مرزهای هندسی مشخص، به وضوح قابل مشاهده هستند. بر اساس این تصاویر می‌توان به بافت نمونه، و همچنین قطعه‌بندی، مقدار و نحوه توزیع فازهای مختلف موجود در آن پی برد.



شکل شماره (۴) تصاویری از یونولومینسانس گسیلی از نواحی مختلف نمونه اسفالریت (با ابعاد حدود $3 \times 3 \text{ mm}^2$). (الف) (ب) (ج)

در تصاویر یونولومینسانس نمونه اسفالریت فازهای با ابعاد، اشکال و رنگ‌های مختلف مشاهده می‌شود. با استفاده از نرم‌افزار ImageJ امکان تعیین ابعاد این نواحی و تشخیص بهتر آن‌ها از یکدیگر وجود دارد. برای این کار، جهت وضوح بیشتر مرزهای بین فازها، از مؤلفه L مربوط به تصویر CIELAB متناظر، استفاده شده است. منحنی مربوط به شدت لومینسانس گسیلی در این مؤلفه و در امتداد خط زرد رنگ شکل ۵ (الف)، در شکل ۵ (ب) نشان داده شده است. بر اساس این منحنی، عرض ناحیه سفید رنگ کوچکی که در شکل "فاز ۱" نام گذاری شده، متناسب با پهنای قله ۱ است که حدود $100 \mu\text{m}$ می‌باشد. همچنین عرض ناحیه سیاه رنگی که ظاهراً گسیلنده لومینسانس نیست و "فاز ۲" نام گذاری شده، متناسب با فواصل بین قله‌های ۲ و ۳ است که حدود $800 \mu\text{m}$ می‌باشد. شکل شماره (۵) تصویر مربوط به مؤلفه L تصویر شکل ۴ (الف). منحنی نمایانگر ابعاد و شدت نسبی مؤلفه لومینسانس گسیلی از



فازهای مشخص موجود در امتداد خط زرد رنگ (ب).

بحث و نتیجه‌گیری :

روش تصویربرداری یونولومینسانس در فشار اتمسفر با ویژگی‌هایی چون حساسیت زیاد کمتر از ppm، امکان تصویربرداری سریع و کوتاه‌تر از یک دقیقه، قابلیت تنظیم دقیق مکان نمونه و تعویض سریع آن، امکان تصویربرداری از تعداد زیاد نمونه‌ها در زمان کم، کاربرد برای نمونه‌های بزرگ، ارزشمند و حساس به خلاء، تحمیل دُز تابشی بسیار کم به نمونه‌ها، به عنوان یک روش غیر مخرب جهت تصویربرداری از نمونه‌های گسیلنده لومینسانس معرفی می‌شود. این روش پتانسیل رقابت با روش شناخته شده تصویربرداری کاتدولومینسانس را دارد.

تاکنون فعالیت‌های انجام شده در سطح دنیا در زمینه تصویربرداری یونولومینسانس با باریکه یونی در فشار اتمسفر، تنها در حد بسیار مقدماتی و به منظور معرفی این روش بوده است. با توجه به سابقه فعالیت‌های انجام شده در زمینه مطالعه



نمونه‌های گسیلنده لومینسانس در آزمایشگاه واندوگراف تهران، پیاده‌سازی این روش تصویربرداری زمینه مناسبی جهت مطالعه دقیق‌تر این نمونه‌ها فراهم خواهد کرد. به نظر می‌رسد استفاده از چیدمان‌های آزمایش با قابلیت تنظیم خودکار تجهیزات و نمونه‌ها می‌تواند گامی مهم جهت به کارگیری متداول این روش در مراکز باریکه یونی در دنیا باشد.

مراجع :

1. J. Götze, "Application of cathodoluminescence microscopy and spectroscopy in geosciences", *Microsc. Microanal.*, 18 (2012) 1270-1284.
2. T. Nikbakht et al., "Ionoluminescence spectroscopy and microscopy of lapis lazuli", *J. Lumin.*, 181 (2017) 246-251.
3. T. Nikbakht et al., "Study of the ionoluminescence behavior of the gemstones: Beryl (aquamarine variety), opal, and topaz", *J. Lumin.*, 171 (2016) 154-158.
4. Alessandro Lo Giudice et al., "In-air broad beam ionoluminescence microscopy as a tool for rocks and stone artworks characterization", *Anal Bioanal Chem*, 404 (2012) 277-281.