

تأثیر تابش گاما بر خواص فوتولومینسانس نیتريد کربن بور و کاربرد آن در دزیمتری

سپیده شفیعی^{*}، سوده سجادی و الهام محقق پور

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

^{*} تهران، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کد پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹.

پست الکترونیکی: sshafiei@aeoi.org.ir

چکیده

در این مطالعه نیتريد کربن گرافیتی ($g-C_3N_4$) به روش بسپارش تراکمی حرارتی از دی‌سیان‌دی‌آمید تهیه شد. سپس نیتريد کربن بور (BCN) با جایگزینی حرارتی اتم‌های کربن با اتم‌های بور زیر ساختار اسید بوریک در ($g-C_3N_4$) به‌دست آمد. برای بررسی کارایی این ماده به‌عنوان دزیمتر، تغییرات در مشخصه فوتولومینسانس BCN تحت تابش گاما بررسی شد. نمونه‌ها با دزهای ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ گری در گاما سل با چشمه کبالت-۶۰ پرتودهی شدند. تغییرات در طیف فوتولومینسانس نمونه‌های پرتودهی شده با کمک یک مدل برازش غیرخطی کمی‌سازی شد. طیف فوتولومینسانس هر نمونه به ۶ پیک گوسی تجزیه شد و تفاوت نسبی در پارامترهای هر یک از این پیک‌ها پس از پرتودهی نسبت به نمونه پرتودهی نشده بررسی شد. نتایج نشان داد که تفاوت نسبی در شدت فوتولومینسانس به‌صورت خطی با دز جذبی تغییر می‌کند و حساسیت آن به دز برای دزیمتری در محدوده ۳۰ تا ۲۰۰ گری مناسب است. ضریب همبستگی برای منحنی کالیبراسیون ۰/۹۹ به‌دست آمد.

کلیدواژگان: نیتريد کربن بور (BCN)، پرتوگاما، دز جذبی، فوتولومینسانس.

۱. مقدمه

بین گرافن، نیتريد بور و نیتريد کربن گرافیتی ($g-C_3N_4$) دارد [۴،۳]. مطالعات نظری و تجربی نشان داده است که BCN به‌دلیل خواص نوری، الکتریکی، مکانیکی و حرارتی برجسته‌ای آن کاربردهای بالقوه زیادی دارد [۵-۷]. BCN به روش‌های مختلفی مانند رسوب بخار شیمیایی [۸-۱۰]، پراکنش به روش فرکانس رادیویی [۱۱، ۱۲]، کندوپاش مغناطیسی [۱۳]، تخلیه

با توسعه گرافن به عنوان یک ماده دو بعدی، علاقه به تحقیقات در زمینه موادی مانند نیتريد بور (BN)، کاربید بور (B_4C) گسترش یافت [۲، ۱]. یکی از مواد این خانواده نیتريد کربن بور (BCN) است که در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. این ماده یک ترکیب سه گانه از بور-کربن-نیتروژن است که بسته به ترکیب و ساختار آن خواصی

قوس الکتریکی [۱۴] و روش‌های سنتز در فشار و دمای بالا [۱۵] تهیه شده است.

نسبت مختلف بور، کربن و نیتروژن در BCN بر خواص فیزیکی و شیمیایی آن تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، افزایش غلظت بور در ساختار BCN فعالیت فوتوکاتالیستی این ماده را بهبود می‌بخشد [۱۶]. به‌همین منظور در تعدادی از مطالعات BCN با وارد کردن بور در ساختار $g-C_3N_4$ تهیه شده است. در این روش ابتدا $g-C_3N_4$ با عملیات حرارتی از مخلوط برخی پیش‌سازهای آلی غنی از نیتروژن، مانند سیانامید، دی‌سیانامید، ملامین، تیوره و اکسید بور سنتز شده است [۱۰، ۱۷، ۱۸]. سپس BCN با جایگزینی حرارتی اتم‌های کربن با اتم‌های بور در $g-C_3N_4$ به‌دست می‌آید.

تأثیر پرتوگاما بر خواص فوتولومینسانس $g-C_3N_4$ نشان داد که این ماده قابلیت استفاده به‌عنوان دزیتر را دارد [۱۹]. شدت گسیل فوتولومینسانس $g-C_3N_4$ هنگامی که تحت تابش با دزهای جذبی کمتر از ۳/۲۵ گری قرار می‌گیرد کاهش می‌یابد. این امر کارایی این ماده را محدود می‌کند. از سوی دیگر قابلیت این ماده برای به‌کارگیری به‌عنوان دزیتر تنها در دزهای بسیار پایین بررسی شده است.

از این‌رو در این مطالعه جهت بهبود ویژگی فوتولومینسانس $g-C_3N_4$ ، بور در ساختار آن وارد و ماده BCN سنتز شد. اثر پرتوگاما در محدوده دز جذبی ۳۰ تا ۲۰۰ گری بر طیف فوتولومینسانس BCN بررسی شد.

۲. روش آزمایش

۱.۲. سنتز نیتريد کربن بور (BCN)

سنتز نیتريد کربن بور بر اساس روشی که قبلاً گزارش شده بود انجام شد [۲۰]. در ابتدا پودر $g-C_3N_4$ به روش اسپارش تراکمی با حرارت دادن دی‌سیان‌دی‌آمید در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت با نرخ حرارت دهی ۲/۲ درجه

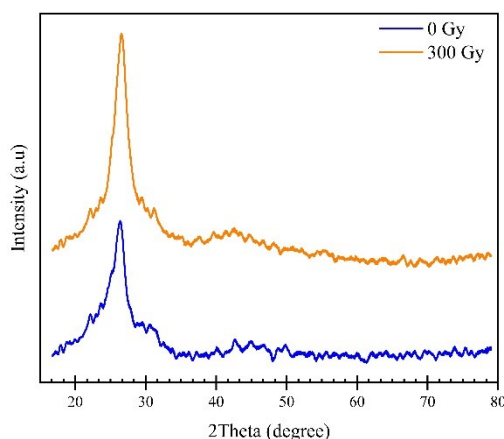
سانتی‌گراد در دقیقه سنتز شد. سپس ۳ گرم از این پودر به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب دوبار تقطیر اضافه شد و ۰/۹ گرم اسید بوریک با آن مخلوط شد. برای توزیع یکنواخت ذرات در آب، مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در معرض امواج فراصوت قرار داده شد. سپس تحت هم‌زدن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد تا آب آن تبخیر شود. پیش ماده به‌دست آمده در بوتله آلومینیومی درب دار ریخته و با نرخ ۳/۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه در کوره موفلی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت جو نیتروژن کلسینه شد. در نهایت اجازه داده شد تا دمای سیستم به‌طور طبیعی با دمای اتاق هم‌دما شود.

۲.۲. پرتو دهی نمونه‌ها

مقدار مساوی از نمونه به‌دست آمده در میکروتیوب‌های مختلف ریخته شد و با چشمه کبالت-۶۰ در گاما سل ۲۲۰ پرتو دهی شد. میانگین انرژی پرتوهای گامای چشمه کبالت-۶۰، ۱/۲۵ مگا الکترون‌ولت است. آهنگ دز این چشمه ۰/۶ گری بر ثانیه است. خطای پرتو دهی ۲٪ است. گاما سل با استفاده از دزیتر مرجع سولفات آهن (فریک) کالیبره شده است (ASTM standard practice E۱۰۲۶T, ۲۰۰۴) نمونه‌ها در گروه‌های ۵ تایی با دزهای جذبی از ۳۰ تا ۲۰۰ گری پرتو دهی شدند. یک نمونه پرتو دهی نشده به‌عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شد.

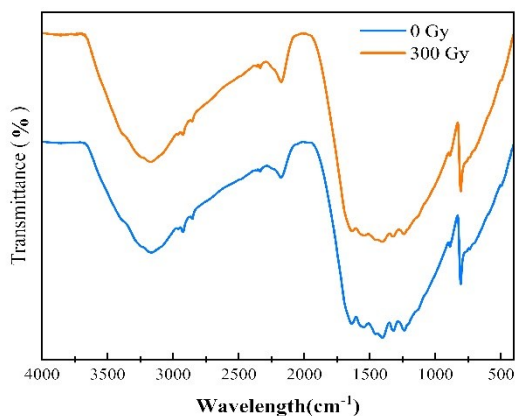
۳.۲. اندازه‌گیری فوتولومینسانس

طیف‌های فوتولومینسانس با استفاده از اسپکتروفتومتر فلورسانس FL-Arn-۲۰ به‌وسیله کووت کوآرتز با طول ۱۰ میلی‌متر و حجم ۳/۵ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد. ابتدا مقدار مشخصی از نمونه‌های پرتو دهی شده و همچنین نمونه کنترل به آب مقطر اضافه شد تا غلظت نهایی ۱ میلی‌گرم در میلی‌لیتر به‌دست آید. سپس نمونه‌ها برای چند ثانیه در معرض امواج فراصوت قرار گرفتند تا محلول یکنواختی به دست آید.



شکل (۱): طیف XRD نمونه BCN قبل و بعد از پرتو دهی با پرتو

گاما با دزه جذبی ۳۰۰ Gy.



شکل (۲): طیف FT-IR نمونه BCN قبل و بعد از پرتو دهی با پرتو

گاما با دزه جذبی ۳۰۰ Gy.

در طیف FT-IR نمونه BCN سنتز شده و BCN پرتو دهی شده دو باند را در حدود 1320 cm^{-1} و 807 cm^{-1} نشان می‌دهد که به ترتیب مربوط به ارتعاش کششی داخل صفحه B-N و ارتعاش خمشی B-N-B است. علاوه بر این، نوار پهن در حدود 3166 cm^{-1} را می‌توان به پیوندهای O-H و N-H نسبت داد. سه نوار جذبی در حدود 2171 cm^{-1} ، 1627 cm^{-1} و 1233 cm^{-1} به ترتیب مربوط به ارتعاشات گروه‌های C≡N، C=N و B-O هستند [۲۱]. از نتایج آنالیز FT-IR نمونه‌ها قبل و بعد از پرتو دهی می‌توان نتیجه گرفت که هیچ تغییر کیفی در

آنگاه طیف‌های فوتولومینسانس نمونه‌ها در دمای اتاق گرفته شد.

۲.۴. آنالیز داده‌ها

اثر پرتو دهی بر خواص فوتولومینسانس نمونه‌ها با واهم-آمیخت^۱ طیف‌های فوتولومینسانس آن‌ها به شش تابع گوسی بررسی شد. هر تابع گوسی دارای سه پارامتر دامنه، مکان و پهنای پیک است؛ بنابراین برای واهم-آمیخت هر طیف فوتولومینسانس هجده پارامتر نامشخص وجود دارد که باید تعیین شوند. این امر محاسبات را پیچیده می‌سازد. به این منظور برنامه‌ای بر پایه الگوریتم لونبرگ-مارکاد^۲ در محیط C++ نوشته شد و پارامترهایی که در آن‌ها کمترین مربعات حاصل شد به عنوان پارامتر نهایی در نظر گرفته شد. پارامترهای به دست آمده، به صورت اختلاف نسبی مقدارهای نرمال شده گزارش شده است.

۳. نتایج

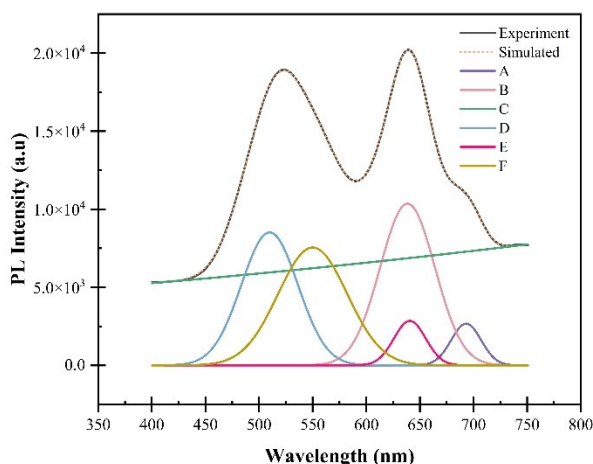
الگوی پراش پرتوی X (XRD) برای نمونه‌های BCN قبل و بعد از پرتو دهی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای هر دو نمونه دو پیک در 2θ حدود ۲۶ و ۴۴ درجه مشاهده می‌شود که به ترتیب مربوط به صفحات پراش (۰۰۲) و (۱۰۰) ساختار شش وجهی نمونه هستند [۲۰]. مقایسه الگوی XRD نمونه‌های BCN قبل و بعد از تابش گاما نشان می‌دهد که تغییری در ساختار کریستالی BCN پس از قرار گرفتن در معرض پرتو گاما وجود ندارد. این مسئله بدان معناست که پرتوهای گاما با انرژی ۱/۵ MeV نمی‌توانند اتم‌های BCN را تغییر دهد و به ساختار کریستالی آن آسیب وارد کنند.

طیف FT-IR نمونه BCN سنتز شده و BCN پرتو دهی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

² Levenberg-Marquardt

¹ deconvolution

پیک‌ها نمی‌توان از روی شکل ۳ به قطعیت نتیجه‌ای گرفت. برای این‌که تغییرات در طیف نمونه‌های پرتودهی شده با دزهای جذبی متفاوت نسبت به نمونه بدون پرتودهی به دقت مورد بررسی قرار گیرد و قابلیت این ماده برای دزیمتری در دزهای جذبی پایین مشخص شود، واهم‌آمیخت طیف فوتولومینسانس نمونه‌ها قبل و بعد از پرتودهی انجام شد. به‌عنوان نمونه، واهم-آمیخت طیف فوتولومینسانس نمونه قبل از پرتودهی در شکل ۴ نشان داده شده است.

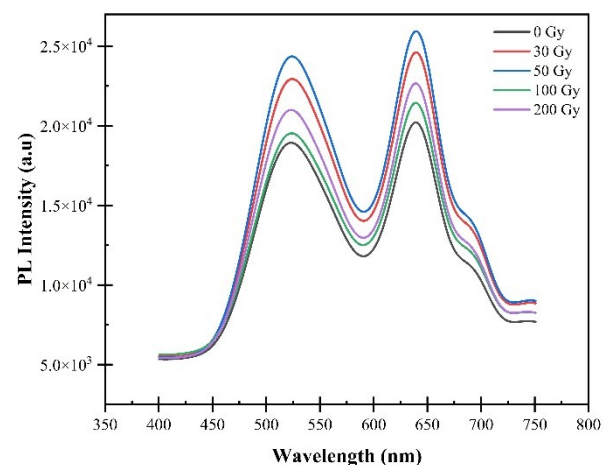


شکل (۴): واهم‌آمیخت طیف فوتولومینسانس نمونه BCN قبل از پرتودهی با استفاده از شش طیف گوسی.

پیک C زمینه طیف را نشان می‌دهد و پنج پیک دیگر در مجموع بادقت بالایی طیف فوتولومینسانس نمونه را ایجاد می‌کنند. پیک B پهنای پیک نشر دوم و همچنین سهم آن در همپوشانی با باند پیک نشر اول را تنظیم می‌کند و پیک E ارتفاع پیک نشر دوم را تنظیم می‌کند. پیک E ارتفاع پیک نشر دوم را تنظیم می‌کند. پیک F همراه با پیک D ارتفاع، پهنای و مکان قله پیک نشر اول در طیف فوتولومینسانس را تنظیم می‌کند. علاوه بر این، پیک F میزان همپوشانی دو پیک نشری را نیز تنظیم می‌کند. بدین ترتیب طیف‌های واهم‌آمیخت با جزئیات بیشتر اطلاعاتی در مورد ویژگی فوتولومینسانس نمونه بر اساس دز جذب شده را نمایش می‌دهند. تفاوت نسبی شدت، مکان و پهنای هر یک از شش پیک گوسی به‌دست‌آمده در دز جذبی

گروه‌های عاملی BCN وجود ندارد اما امکان تغییرات کمی در مقدار این گروه‌ها وجود دارد.

طیف فوتولومینسانس نمونه پرتودهی نشده و نمونه‌هایی که در معرض پرتو قرار گرفته‌اند، در شکل ۳ نشان داده شده است.

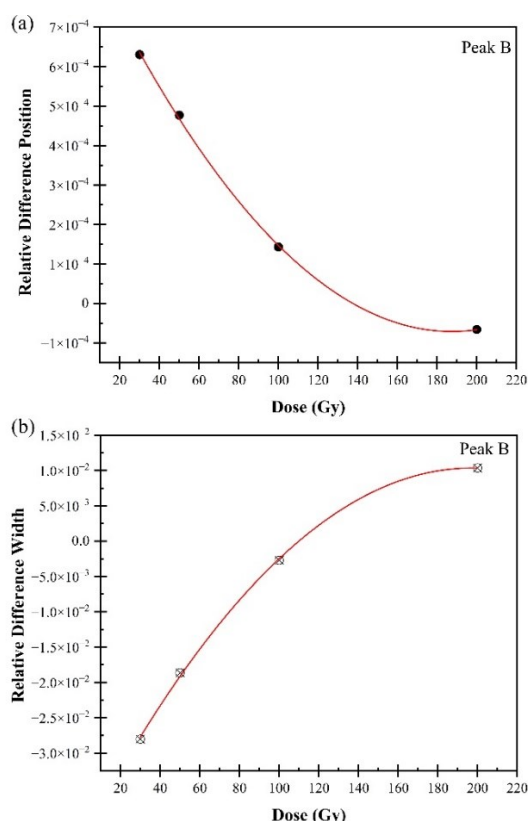


شکل (۳): طیف فوتولومینسانس نمونه BCN قبل و بعد از پرتو دهی با پرتو گاما با دزهای متفاوت.

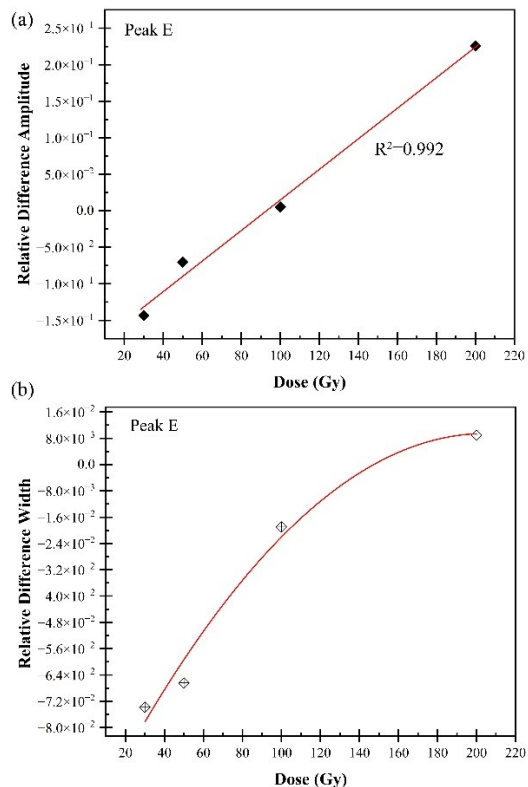
شکل ۳ نشان می‌دهد که در طیف فوتولومینسانس نمونه BCN سنتز شده دو پیک دیده می‌شود [۲۲].

شدت طیف فوتولومینسانس نمونه BCN پس از پرتودهی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش در شدت فوتولومینسانس نمونه‌ای که تحت تابش ۵۰ گری قرار گرفته است مشاهده شد. مکان قله پیک اول هنگامی که نمونه با دز ۳۰ گری پرتودهی می‌شود بیشترین تغییر را در حدود ۰/۹ نانومتر به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر دارد با افزایش دز تابش این تغییر کاهش می‌یابد به‌طوری که مکان قله این پیک در نمونه‌ای که تحت تابش ۲۰۰ گری قرار گرفته با نمونه پرتو دهی نشده یکسان است. مکان قله پیک دوم در نمونه‌هایی که تحت تابش ۳۰ و ۵۰ گری قرار گرفته‌اند در حدود ۰/۳ نانومتر به سمت طول موج‌های بیشتر جابه‌جا شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که BCN می‌تواند به‌عنوان دزیمتر تابش استفاده شود که دز تجمعی را بر اساس تغییر در شدت نشر و تغییر در طول موج گزارش کند. در مورد تغییر در پهنای



شکل (۵): تفاوت نسبی (الف) مکان و (ب) پهنای پیک B نسبت به دز جذبی.



شکل (۶): تفاوت نسبی (الف) ارتفاع و (ب) پهنای پیک E نسبت به دز جذبی.

مختلف نسبت به شدت، مکان و پهنای پیک‌های مشابه در نمونه پرتودهی نشده مورد بررسی قرار گرفت. از میان آن‌ها پارامترهایی که تغییراتشان به خوبی پاسخ نمونه BCN به دز را بیان می‌کند، برای مطالعه در نظر گرفته شد. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نمودار تغییر پارامترهای مختلف این پیک‌ها را نسبت دزهای جذبی مختلف نشان می‌دهد. انحراف از معیار برای داده‌ها کمتر از ۴٪ است. تفاوت نسبی مکان و پهنای طیف B که در شکل‌دهی پیک دوم تأثیر به سزایی دارد با تغییرات دز جذبی رفتار غیرخطی از مرتبه دو را نشان می‌دهند (شکل ۵). مشاهده می‌شود که تفاوت نسبی مکان و پهنای این پیک با افزایش دز جذبی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که همیشه قدر مطلق پارامتر پهنای پیک به عنوان معیار سنجش پهن شدگی پیک در نظر گرفته می‌شود اما در این جا در نظر گرفتن علامت پارامتر پهنای، دقت رابطه بین پهنای و دز تجمعی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین در نمودارها علامت این پارامتر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۵ (الف) مشاهده می‌شود تغییرات تفاوت نسبی مکان پیک B چند صدم درصد است که بسیار کوچک است. شکل ۵ (ب) نشان می‌دهد که تغییرات تفاوت نسبی پهنای این پیک کمتر از ۳ درصد است. بنابراین پهنای این پیک نسبت به مکان آن به دز جذبی حساس‌تر است. پیک دیگری که تغییرات معناداری نسبت به دز جذبی از خود نشان داد پیک E است.

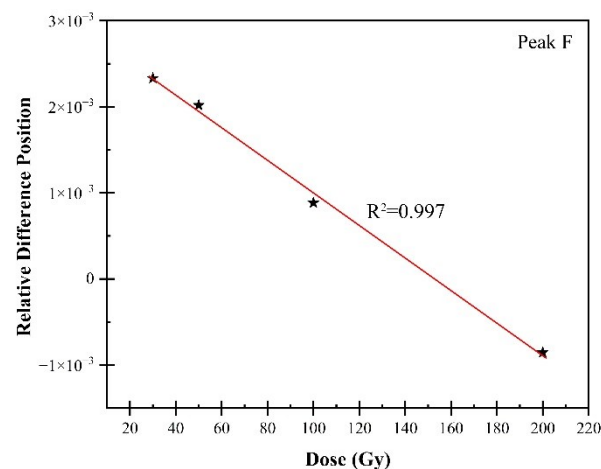
شکل ۶ تفاوت نسبی ارتفاع و پهنای طیف E با تغییرات دز جذبی را نشان می‌دهند. تفاوت نسبی شدت این پیک با افزایش دز جذبی به طور خطی تغییر می‌کند. تغییرات آن کمتر از ۲۰ درصد است و در دز جذبی ۱۰۰ اختلاف در حدود دهم درصد می‌شود. تفاوت نسبی پهنای پیک E با افزایش دز جذبی به طور غیرخطی و از مرتبه دو است. تغییرات تفاوت نسبی پهنای این پیک کمتر از ۸ درصد است و در دز جذبی ۲۰۰ گری کمترین تغییرات را دارد.

۴. نتیجه گیری

خواص نوری BCN هنگامی که در معرض پرتوگاما قرار می گیرد تغییر می کند. این ویژگی سبب می شود که بتوان از آن به عنوان دزیتر استفاده کرد. این تغییرات در محدوده دز جذبی ۳۰ تا ۲۰۰ گری مورد مطالعه قرار گرفت. طیف های فوتولومینسانس نمونه ها با شش طیف گوسی شبیه سازی شد. بررسی هجده پارامتر که بادقت زیادی طیف فوتولومینسانس تجربی هر یک از نمونه ها را بازسازی کردند نشان داد که شدت پیک E بیشترین تغییرات را در نتیجه پرتودهی دارد. تغییرات شدت این پیک نسبت به دز جذبی خطی است؛ بنابراین از تغییرات آن می توان به عنوان معیار دزیتری برای مصارف پرتودهی خون و موتاسیون استفاده کرد. در آینده می توان تحقیقات بیشتری در زمینه تأثیر میزان بور در ساختار BCN بر ویژگی دزیتری آن انجام داد و ساختار بهینه را به دست آورد. همچنین می توان حساسیت این ماده به انواع دیگر تابش ها و پایداری تغییرات پس از قرارگیری در معرض تابش بررسی کرد.

در شکل ۷ تفاوت نسبی مکان پیک F نشان داده شده

است. این پیک در شکل گیری هر دو طیف نقش دارد.



شکل (۷): تفاوت نسبی مکان پیک F نسبت به دز جذبی.

تفاوت نسبی مکان پیک F با افزایش دز جذبی کاهش و سپس افزایش می یابد. تغییرات تفاوت نسبی مکان پیک F نسبت به دز از مرتبه هزارم است. باتوجه به شکل های ۵، ۶ و ۷ تفاوت نسبی شدت پیک E و مکان پیک F با دز جذبی رابطه خطی دارند. این امر این دو پیک را برای بیان ویژگی دزیتری ماده BCN مناسب می سازد. با توجه به این که تغییرات نسبی شدت پیک E نسبت به دز بیشتر است، این پیک شاخص بهتری برای دزیتری با ماده BCN است.

۵. مراجع

1. A. Nag, K. Raidongia, K.P. Hembram, R. Datta, U.V. Waghmare, C. Rao. Graphene analogues of BN: novel synthesis and properties. *ACS Nano*. 4 (3) (2010) 1539-1544.
2. M. Chhowalla, H.S. Shin, G. Eda, L.-J. Li, K.P. Loh, H. Zhang. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature Chem*. 5 (4) (2013) 263-275.
3. F. Freire Jr, D. Reigada, R. Prioli. Boron Carbide and Boron-Carbon Nitride Films Deposited by DC - Magnetron Sputtering: Structural Characterization and Nanotribological Properties. *Phys. Status Solidi (a)*. 187 (1) (2001) 1-12.
4. C. Rao, K. Gopalakrishnan, U. Maitra. Comparative study of potential applications of graphene, MoS₂, and other two-dimensional materials in energy devices, sensors, and related areas. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7 (15) (2015) 7809-7832.
5. S. Angizi, M.A. Akbar, M. Darestani-Farahani, P. Kruse. Two-dimensional boron carbon nitride: a comprehensive review. *ECS J. Solid State Sci. Technology* 9 (8) (2020) 083004.
6. V.S. Sulyaeva, Y.M. Rumyantsev, V.G. Kesler, M.L. Kosinova. Synthesis and optical properties of BC_xN_y films deposited from N-triethylborazine and hydrogen mixture. *Thin Solid Films* 81 (2015) 59-64.
7. K. Gopalakrishnan, K. Moses, A. Govindaraj, C. Rao. Supercapacitors based on nitrogen-doped reduced graphene oxide and borocarbonitrides. *Solid State Commun.* 175 (2013) 43-50.
8. M. Oliveira, A.B. Do Rego, O. Conde. XPS investigation of B_xN_yC_z coatings deposited by laser

- assisted chemical vapour desposition. Surface and coatings technology. 100 (1998) 398-403.
9. E. Dekempeneer, J. Meneve, S. Kuypers, J. Smeets. Tribological properties of rf PACVD amorphous BNC coatings. *Thin Solid Films* 281 (1996) 331-333.
 10. N. Urakami, M. Kosaka, Y. Hashimoto. Chemical Vapor Deposition of Boron - Incorporated Graphitic Carbon Nitride Film for Carbon - Based Wide Bandgap Semiconductor Materials. *Phys. Status Solidi (b)*. 257 (2) (2020) 1900375.
 11. A. Prakash, K.B. Sundaram. Studies on electrical properties of RF sputtered deposited boron carbon nitride thin films. *ECS J. Solid State Sci. Technology*. 4 (5) (2015) N25.
 12. V.O. Todi, B.P. Shantheyanda, R.M. Todi, K.B. Sundaram, K. Coffey. Optical characterization of BCN films deposited at various N₂/Ar gas flow ratios by RF magnetron sputtering. *Mater. Sci. Engineering: B*. 176 (12) (2011) 878-882.
 13. S. Kouptsidis, H. Lüthje, K. Bewilogua, A. Schütze, P. Zhang. Deposition of c-BN films by DC magnetron sputtering. *Diamond Related Mater.* 7 (1) (1998) 26-31.
 14. D.E. Gourari, M. Razafinimanana, M. Monthioux, R. Arenal, F. Valensi, S. Joulie, V. Serin. Synthesis of (BCN) nanomaterials by arc discharge using heterogeneous anodes. *Plasma Sci. Technology*. 18 (5) (2016) 465.
 15. F. Zhou, K. Adachi, K. Kato. Friction and wear behavior of BCN coatings sliding against ceramic and steel balls in various environments. *Wear* 261 (3-4) (2006) 301-310.
 16. P. Chen, P. Xing, Z. Chen, H. Lin, Y. He. Rapid and energy-efficient preparation of boron doped g-C₃N₄ with excellent performance in photocatalytic H₂-evolution. *Int. J. Hydrogen Energy* 43 (43) (2018) 19984-19989.
 17. M. Kaur, R.A. Mir, I. Chauhan, K. Singh, U. Krishnan, M. Kumar, P. Devi, O. Pandey, A. Kumar. Defect states induced luminescence and electrochemical studies of boron carbon nitride nanosheets. *Appl. Surface Sci.* 559 (2021) 149982.
 18. X. Wang, B. Liu, X. Xiao, S. Wang, W. Huang. Boron dopant simultaneously achieving nanostructure control and electronic structure tuning of graphitic carbon nitride with enhanced photocatalytic activity. *J. Mater. Chem. C*. 9 (41) (2021) 14876-14884.
 19. M. Perez, M. Vallejo, C. Gómez, E. Montes, J. Elias, A. Torres-Castro, H. Vega-Carrillo, M. Sosa. Dosimetric analysis of graphitic carbon nitride quantum dots exposed to a gamma radiation for a low-dose applications. *Appl. Radiat. Isot.* 184 (2022) 110200.
 20. Q. Weng, B. Wang, X. Wang, N. Hanagata, X. Li, D. Liu, X. Wang, X. Jiang, Y. Bando, D. Golberg. Highly water-soluble, porous, and biocompatible boron nitrides for anticancer drug delivery. *ACS Nano*. 8 (6) (2014) 6123-6130.
 21. R. Mighri, U.B. Demirci, J.G. Alauzun. Microporous borocarbonitrides B_xC_yN_z: Synthesis, characterization, and promises for CO₂ capture. *Nanomaterials* 13 (4) (2023) 734.
 22. A. Prakash, K.B. Sundaram, A.D. Campiglia. Photoluminescence studies on BCN thin films synthesized by RF magnetron sputtering. *Mater. Letters* 183 (2016) 355-358.