

تأثیر دمای پخت بر خواص ساختاری و نوری نانوذرات فریت بیسموت

BiFeO₃

سید ابراهیم موسوی قهفرخی*، محمد رحیمی لرکی، ایرج کاظمی نژاد

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

دریافت: 1397/01/29 ویرایش نهائی: 1397/08/17 پذیرش: 1397/09/07

چکیده

در این مقاله، نانوذرات فریت بیسموت (BiFeO₃) به روش سل-ژل تهیه شدند. برای پی بردن به گستره دمایی پخت نانوذرات فریت بیسموت آنالیز توزین حرارتی (TGA) و آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA) بر روی ژل خشک انجام شد. با استفاده از نتایج آنالیزهای حرارتی TGA و DTA و به منظور بررسی خواص ساختاری و نوری نمونه‌ها عملیات پخت در دماهای 600، 650، 700، 750، 800 و 850°C انجام شد. سپس خواص ساختاری نمونه‌ها با آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD)، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FT-IR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل‌میدانی (FESEM) مورد بررسی قرار گرفت. خواص نوری نمونه‌ها با آنالیزهای طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش (UV-Vis) و طیف فوتولومینسانس (PL) مورد مشخصه‌یابی قرار گرفتند. نتایج آنالیز XRD و FT-IR نشان می‌دهد که نمونه‌ها دارای ساختار پروسکایت اعوجاج یافته می‌باشند. نتایج آنالیز FESEM نشان داد که با افزایش دمای پخت اندازه نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنالیزهای UV-Vis و PL نیز نشان می‌دهند نمونه‌ها دارای گاف انرژی در حدود 2(eV) بوده و نیم‌رسانا هستند.

کلیدواژگان: BiFeO₃، نانوذرات، روش سل-ژل، آنالیز حرارتی، خواص ساختاری، خواص نوری

و یا فروترویدیکی⁵ باشند، مواد فروئیک⁶ می‌گویند.

مواد چند فروئی⁷ به دسته‌ای از مواد گفته می‌شود که می‌توانند دو یا چند نظم فروئیکی را هم‌زمان دارا باشند. نظم‌های فروئیکی⁸ شامل چهار نظم فرومغناطیس، فروالکتریک، فروکشسان و فروترویدیک می‌باشد. هرچند امروزه اغلب به هر ترکیبی که خاصیت فروالکتریکی و مغناطیسی (فرومغناطیس یا پادفرومغناطیس) را به‌طور هم‌زمان دارا باشد چندفروئی

مقدمه

فریت‌ها¹ به گروهی از مواد مغناطیسی گفته می‌شود که جزء اصلی تشکیل دهنده آنها اکسید آهن است و پارامترهای مغناطیسی نظیر نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی بالا از جمله اصلی‌ترین ویژگی‌های آنها به‌شمار می‌رود [1]. به‌موادی که دارای نظم‌های فرومغناطیسی²، فروالکتریکی³، فروکشسانی⁴ و

* نویسنده مسئول: musavi_ebrahim@yahoo.co.uk

1 ferrites

2 ferromagnetic

3 ferroelectric

4 ferroelastic

5 ferrotroic

6 ferroic

7 multiferroic

8 ferroic orders

باز نشر این مقاله با ذکر منبع آزاد است.

این مقاله تحت مجوز کپی‌رایت کامنز تعصبی 4.0 بین‌المللی می‌باشد

شد. برای اولین بار رامش و همکاران در سال 2003، در پژوهشی که بر روی لایه نازک فریت BFO انجام دادند خواص مغناطیسی بالا و قطبش پذیری خوب تا 15 برابر نمونه انبوه را گزارش کردند. نیاز روزافزون به ریزتر کردن تجهیزات الکترونیکی در دهه های اخیر باعث تحقیقات وسیع در زمینه این مواد شده است [10 و 11]. از مهم ترین تحقیقات انجام شده بر روی BFO، می توان به بررسی اثر دمای پخت بر خواص مختلف انواع نانو ساختارهای آن اشاره کرد [12 و 13]، با این وجود بررسی های بسیار کمی در زمینه خواص نوری BFO صورت گرفته است. همچنین در سال های اخیر مشخص شده است که روش ساخت نانوذرات فریت BFO در خواص ساختاری و نوری آن مؤثر بوده است. بنابراین روش های مختلفی همچون سل-ژل⁷ [11]، هم رسوبی [9] و مایکروویو⁸ [14] برای ساخت نانوذرات فریت BFO وجود دارد. در این تحقیق به دلیل رشد در دمای پایین و تهیه محصولات با خلوص بالا از روش سل-ژل برای ساخت نانوذرات فریت BFO استفاده می شود و پس از ساخت این فریت خواص ساختاری و نوری آن مورد بررسی خواهد گرفت.

کارهای آزمایشگاهی

مقادیر مورد نیاز از مواد اولیه برای ساخت نانوذرات BFO به روش سل-ژل، با استفاده از معادله واکنش شیمیایی موازنه شده زیر تعیین می گردد.

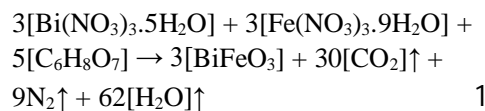
گفته می شود [2]. استفاده از ترکیبی از نظم های فروئیکی به طور هم زمان در یک ماده، در کاربردی شدن آن نقش مهمی دارد. در بین مواد چند فروئی، فریت بیسموت¹ با فرمول شیمیایی $(\text{BFO})\text{BiFeO}_3$ به علت دارا بودن خاصیت چند فروئی در دمای اتاق بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این ترکیب یک فروالکترونیک قوی با دمای کوری² $(T_C=1103\text{K})$ و یک پادفرومغناطیس با دمای نیل³ $(T_N=643\text{K})$ است [3 و 4]. [3 و 4]. هم چنین تنها ماده چند فروئی تک فاز است که در دماهای بالاتر از دمای محیط هر دو نوع نظم فروالکترونیک و نظم پادفرومغناطیسی را دارا می باشد. ساختار بلوری این فریت به صورت پرووسکایت⁴ اعوجاج یافته (ABO_3) با گروه فضایی R_3C است که در آن A عناصر خاکی نادر مانند بیسموت (Bi)، هولمیوم (Ho) و ایتیم (Y) و B عناصر دو ظرفیتی مانند آهن (Fe)، کروم (Cr) و منگنز است [5 و 6]. فریت BFO به علت گاف نواری حدود 2 eV یک ماده ایده آل جهت ساخت قطعات الکترونیکی از قبیل حسگرها، آشکارسازها و حافظه های غیر فرار است [7]. استفاده از واژه چند فروئی برای بعضی مواد اولین بار توسط اشمید⁵ در سال 1994 مورد استفاده قرار گرفت [8]. از سال 1959 ساخت فریت BFO به صورت نمونه انبوه⁶ مورد بررسی قرار گرفت ولی چون نمونه انبوه آن خواص مغناطیسی و الکترونیک مناسبی نداشت مدتی به فراموشی سپرده شد [9]. با ورود فن آوری نانو خواص و کاربردهای جدیدی برای این فریت شناخته

⁶bulk⁷sol-gel⁸microwave¹bismuth ferrite²Curie temperature³Neel temperature⁴perovskite⁵Schmid

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) با دستگاه مدل MIRA3 مورد بررسی قرار گرفت. همچنین خواص نوری نمونه‌ها توسط دستگاه‌های طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش (UV-Vis) و طیف فوتولومینسانس (PL) مورد مشخصه‌یابی قرار گرفت.

نتایج و بحث

آنالیزهای حرارتی TGA و DTA با استفاده از 10,58mg ژل خشک ماده BiFeO_3 با pH=7 در اتمسفر هوا با آهنگ گرمایش $10 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$ ، در گستره دمایی 40 تا 1000°C انجام شد که نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. شکل 1 سه مرحله کاهش وزن ژل خشک را نشان می‌دهد. اولین مرحله در گستره دمایی 80 تا 180°C به مقدار 4 درصد به علت تبخیر آب باقی مانده و ترکیبات آلی فرار در نمونه است. دومین مرحله در گستره دمایی 180 تا 270°C به مقدار 70 درصد که ناشی از سوختن اسید سیتریک و تجزیه کامل نیترات‌ها و ترکیبات آلی موجود در نمونه است. سومین مرحله کاهش وزن در گستره دمایی 270 تا 870°C به مقدار 3 درصد به علت تشکیل فاز اصلی ماده، BiFeO_3 و فازهای ناخالصی Bi_2O_3 ، Fe_2O_3 و $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ است. کاهش وزن مشاهده شده پس از دمای 900°C نیز مربوط به سوختن و از بین رفتن بعضی از عناصر موجود در نمونه‌ها می‌باشد. شکل 2 سه دره گرماگیر و یک قله گرمازا در نمودار DTA را نشان می‌دهد. دو دره گرماگیر اول در حوالی 130 و 165°C به علت تبخیر آب باقی مانده و ترکیبات آلی فرار در نمونه می‌باشد. دره گرماگیر سوم در حوالی 280°C مربوط به تجزیه اسید سیتریک، نیترات‌ها و ترکیبات آلی است. تنها قله گرمازا در حوالی 205°C ناشی از واکنش بین نیترات‌های فلزی و اسید سیتریک است [15 و 16].

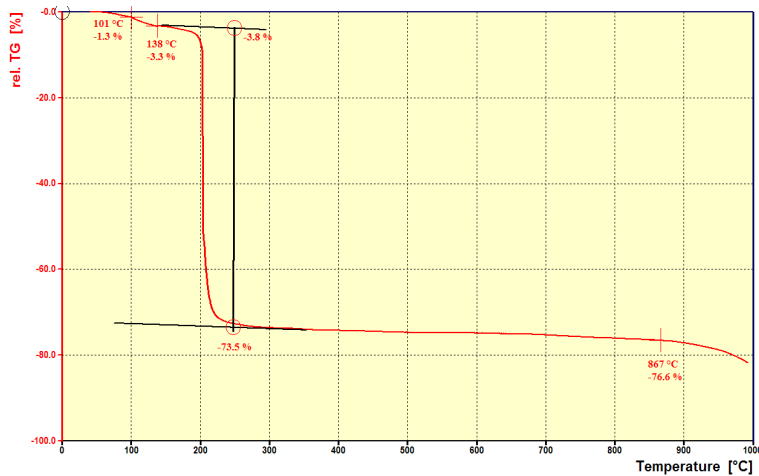


به‌طور مثال برای ساخت 2 گرم BiFeO_3 از مواد خام اولیه با مقادیری که در جدول 1 آمده استفاده شد.

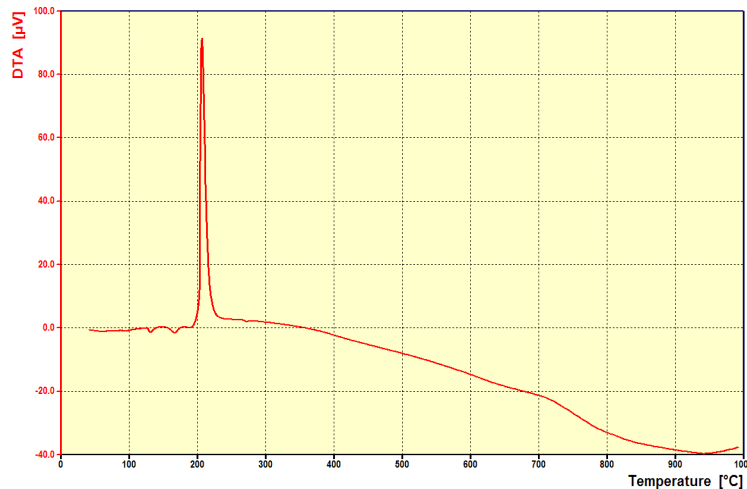
جدول 1. اطلاعات مواد اولیه برای ساخت 2 گرم BiFeO_3 .

جرم ماده (g)	ضریب مولی در واکنش	جرم مولی ($\frac{\text{g}}{\text{mol}}$)	ماده اولیه
3,101	3	485,072	نیترات- بیسموت
2,583	3	403,997	نیترات آهن
2,047	5	192,124	اسید سیتریک

لازم به ذکر است جرم مولی BiFeO_3 $\frac{312,124 \text{ g}}{\text{mol}}$ می‌باشد. برای تهیه 2 گرم از نانوذرات فریت بیسموت به روش سل-ژل، ابتدا به میزان مقادیر آورده شده در جدول 1 از نیترات بیسموت $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ و نیترات آهن $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ را درون آب دوبار یون‌زدایی شده ریخته و بر روی یک هم‌زن مغناطیسی قرار داده تا محلول همگن و سفید رنگی به دست آید. پس از 30 دقیقه به آرامی اسید سیتریک $\text{C}_7\text{H}_8\text{O}_6$ به آن افزوده می‌شود. مجدداً پس از 30 دقیقه، برای تعیین pH=7 آمونیاک به صورت قطره‌ای به محلول اضافه شده و پس از 30 دقیقه محلول را درون حمام آب با دمای 80°C قرار داده تا ژل مورد نظر تشکیل گردد. ژل به دست آمده به مدت 48 ساعت درون آون با دمای 70°C قرار داده شد تا کاملاً خشک شود. ژل خشک را آسیا نموده و در دماهای 600، 650، 700، 750، 800 و 850°C با زمان 60 دقیقه پخت گردید. نمونه‌ها را پس از پخت مجدداً آسیا کرده و خواص ساختاری آن‌ها توسط پراش اشعه ایکس (XRD) با دستگاه مدل Philips، طیف‌سنجی تبدیل فوریه-مادون قرمز (FT-IR) با دستگاه مدل BOMEN/MB102.



شکل 1. نمودار آنالیز TGA ژل خشک BiFeO₃.



شکل 2. نمودار آنالیز DTA ژل خشک BiFeO₃.

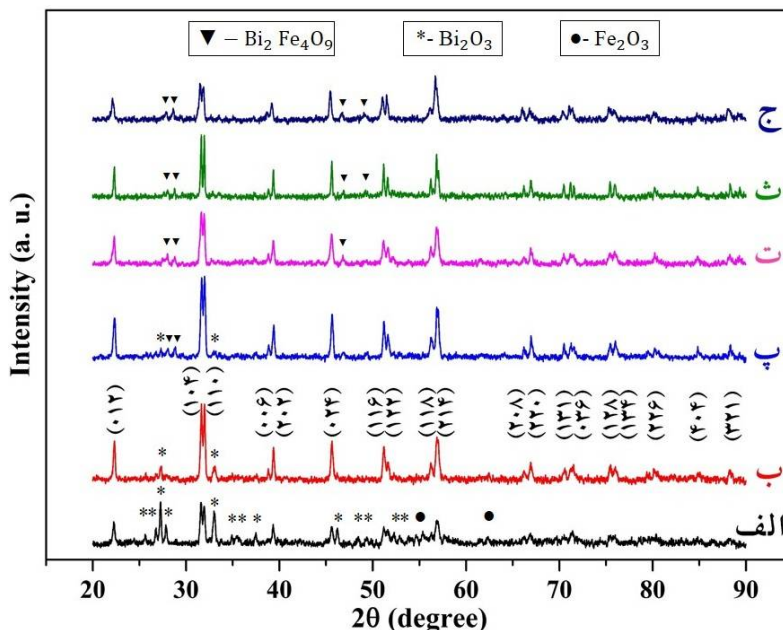
در رابطه 2، I_x و I_y شدت فازهای موجود در نمونه است [17]. مشخص شد که نمونه تهیه شده در دمای پخت 600°C دارای مقادیر بسیار زیادی از ناخالصی‌های Fe_2O_3 و Bi_2O_3 می‌باشد و در نتیجه درصد فاز اصلی BFO ($BiFeO_3$) کم است. ناخالصی‌های Bi_2O_3 و Fe_2O_3 در دماهای پخت پایین ایجاد می‌شود و ناشی از فرایند تشکیل فریت BFO می‌باشد زیرا BFO از تجزیه Bi_2O_3 و Fe_2O_3 تشکیل می‌گردد. با افزایش دمای پخت به 650°C میزان تجزیه Bi_2O_3 و Fe_2O_3 بیشتر شده و فاز Fe_2O_3 کاملاً از بین رفته به طوری که در این دما بیشترین درصد فاز اصلی BFO تشکیل شده

شکل 3 الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌های تهیه شده در دماهای پخت 600، 650، 700، 750، 800 و 850°C و با زمان پخت 60 دقیقه را نشان می‌دهد. با استفاده از برنامه High Score Plus و مقایسه الگوهای پراش با کارت‌های استاندارد نمونه BFO (JCPDS: 01-086-1518)، Bi_2O_3 (JCPDS: 01-0699-014) و Fe_2O_3 (JCPDS: 00-039-0238) و $Bi_2Fe_4O_9$ (JCPDS: 00-072-1832) و رابطه 2، درصد فاز اصلی و فازهای ناخالصی تعیین شد.

$$\text{درصد فاز} = \frac{\sum I_x}{\sum I_x + \sum I_y + \dots} \times 100 \quad 2$$

$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ تبدیل می‌گردد [19 و 18]. در ضمن قله‌های فازهای ناخالصی با نماد در شکل 3 مشخص شده‌اند و قله‌های بدون نماد مربوط به فاز اصلی BFO می‌باشد.

است. در دمای پخت 700°C فاز $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ ظاهر شده و با افزایش دمای پخت درصد فاز $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ افزایش ولی درصد فاز اصلی کاهش یافته است، زیرا در دماهای بالا مقداری از BiFeO_3 تجزیه شده و به



شکل 3. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های پخت شده در دماهای الف) 600، ب) 650، پ) 700، ت) 750، ث) 800 و ج) 850°C .

در رابطه 4، (hkl) شاخص‌های میلر و d فاصله بین صفحات بلوری است که از رابطه 6 محاسبه شد [20].

$$2d \sin\theta = \frac{6}{n\lambda}$$

نتایج حاصل از این اندازه‌گیری‌ها در جدول 2 آورده شده است. از جدول 2 مشاهده می‌شود که ثابت‌های شبکه در دماهای پخت مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و به همین دلیل حجم یاخته یک‌ه نیز با افزایش دما تغییر محسوسی نکرده است اما اندازه متوسط ریز بلورک‌ها با افزایش دمای پخت افزایش یافته است که به علت ذوب‌شدگی سطحی نانوذرات در دماهای بالا است [21].

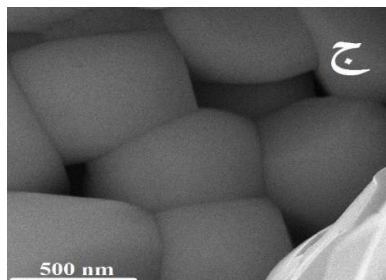
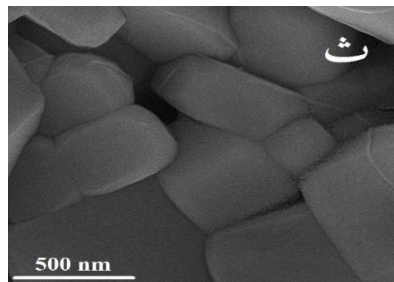
اندازه متوسط ریزبلورک‌ها (D) با استفاده از قله‌های (012) ، (104) ، (110) ، (024) و (214) به کمک رابطه شرر 3 محاسبه شد.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad 3$$

در رابطه 3، λ طول موج پرتو ایکس ($\lambda=1.54\text{\AA}$)، β بزرگی پهنا در نصف ارتفاع قله و θ زاویه قله می‌باشد. همچنین ثابت‌های شبکه a و c با استفاده از شاخص‌های میلر قله‌های (104) و (110) از رابطه 4 و حجم یاخته یک‌ه (V_{cell}) از رابطه 5 محاسبه گردید.

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad 4$$

$$V_{\text{cell}} = a^2 c \sin 120 = 0.8666 a^2 c \quad 5$$



شکل 5. تصاویر آنالیز FESEM نمونه‌های پخت شده در دمای الف) 600، ب) 650، پ) 700، ت) 750، ث) 800 و ج) 850°C.

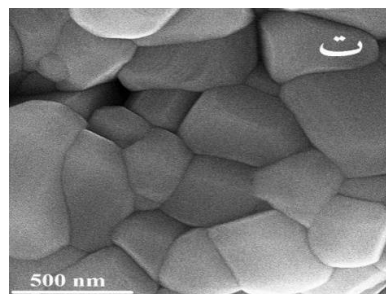
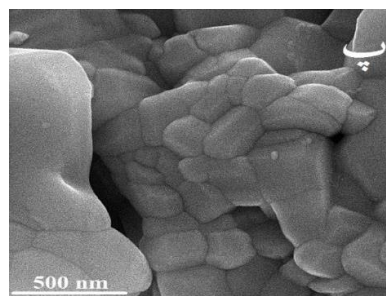
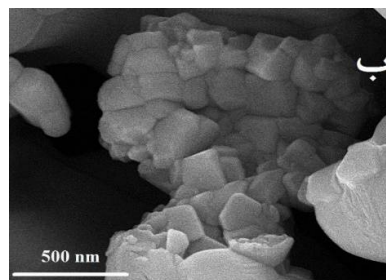
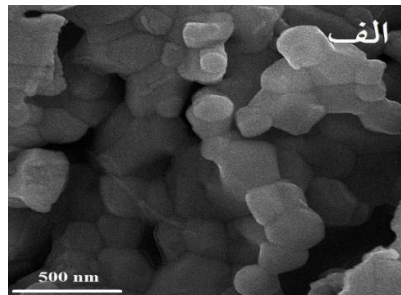
جدول 3. متوسط اندازه نانوذرات در دماهای پخت مختلف.

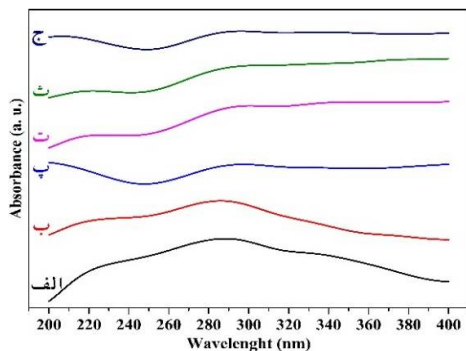
دمای پخت (°C)	متوسط اندازه نانوذرات (nm)
600	81
650	98
700	144
750	259
800	329
850	452

نتایج حاصل از آنالیز UV-Vis نمونه‌های پخت شده در دماهای پخت 600، 650، 700، 750، 800 و 850 °C در شکل‌های 6 و 7 آورده شده‌اند. شکل 6 طیف جذبی نمونه‌ها می‌باشد. همان‌طوری‌که مشاهده می‌گردد نمونه‌ها دارای قله‌ای پهن در حوالی 290nm می‌باشند که مربوط به طیف جذبی در ناحیه فرابنفش است. شکل 7 نمودارهای $(\alpha h\nu)^2$ برحسب $h\nu$ نمونه‌ها برای یافتن گاف اپتیکی آن می‌باشد. به‌منظور تعیین گاف اپتیکی نمونه‌ها، از داده‌های آنالیز UV-Vis و رابطه 7 استفاده شد.

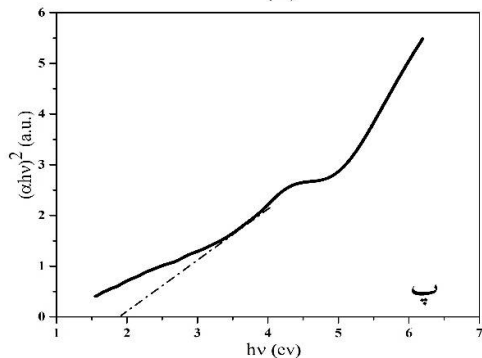
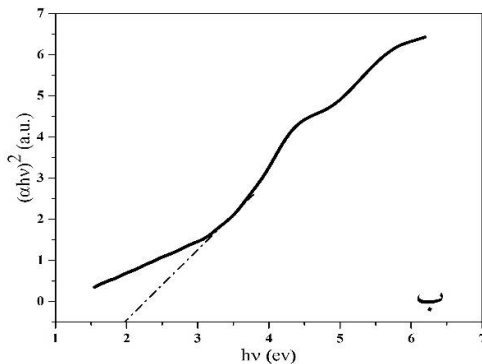
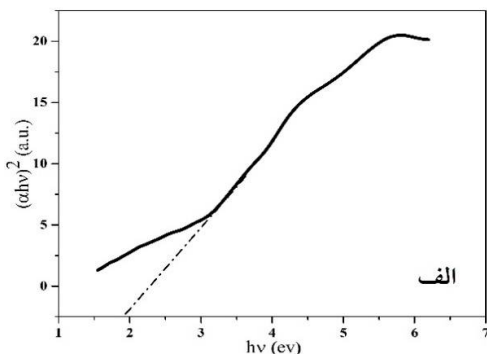
$$(\alpha h\nu)^2 = A (h\nu - E_g)^n \quad 7$$

از ساختار لوزی‌رخ به مکعبی تبدیل شده است، زیرا با افزایش دمای پخت، طول پیوند Bi-Fe و اندازه زوایای Fe-O-Fe و O-Fe-O افزایش می‌یابد [7].





شکل 6. طیف UV-Vis نمونه‌های پخت شده در دماهای الف) 600، ب) 650، پ) 700، ت) 750، ث) 800 و ج) 850°C.

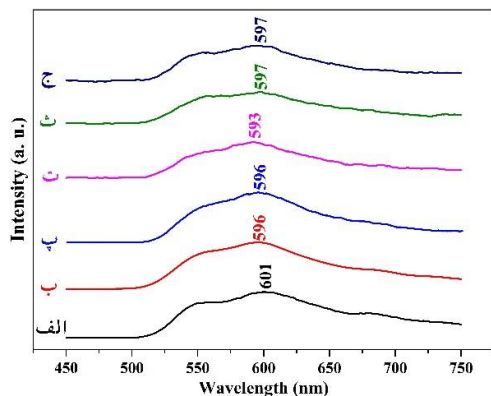


در رابطه 7، $h\nu$ انرژی فوتون فرودی، α ضریب جذب اپتیکی، A ضریب ثابت، n به نوع انتقال اپتیکی بستگی دارد. برای نیم‌رساناها با گاف مستقیم مقدار آن 1 و برای گاف‌های غیر مستقیم مساوی 2 می‌باشد و E_g گاف اپتیکی می‌باشد. نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب $h\nu$ ترسیم و با رسم خطی مماس بر قسمت خطی منحنی‌ها گاف انرژی اندازه‌گیری گردید [27]. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های گاف اپتیکی نمونه‌ها در جدول 4 آورده شده‌اند. همان‌طوری که نتایج این جدول نشان می‌دهد تمامی نمونه‌ها نیم‌رسانا می‌باشند. هم‌چنین با افزایش دمای پخت، اندازه گاف اپتیکی کاهش می‌یابد. یکی از دلایل کاهش اندازه گاف اپتیکی، تغییر ساختار نمونه‌ها در اثر افزایش دمای پخت از لوزی‌رخ به مکعبی می‌باشد [18 و 5]. هم‌چنین نوع و درصد ناخالصی نیز در کاهش گاف اپتیکی تأثیرگذار است. محدوده گاف اپتیکی به دست آمده به‌روش تاک نمونه‌های ساخته شده مطابق جدول 4 در محدوده 1/50-1/94 eV است و با طیف فوتولومینسانس مطابق جدول 5 در محدوده 2/063-2/091 است که با کار دیگران که روش ساخت آن مشابه با کار ما است سازگاری خوبی دارد [28]. هم‌چنین گاف اپتیکی فریت BFO خالص ساخته شده توسط دیگران به‌روش هیدروترمال در محدوده 1/97-2/12 است که اختلافی بسیار جزئی دارد با کار ما دارد که این اختلاف ناشی از وجود ناخالصی در نمونه است [5 و 29].

در شکل 8 طیف فوتولومینسانس (PL) نمونه‌های پخت شده در دماهای پخت 600، 650، 700، 750، 800 و 850°C مشاهده می‌گردد. تمامی نمونه‌ها دارای قله‌ای پهن در حوالی 600nm می‌باشند که مربوط به طیف نشری رنگ نارنجی است. با استفاده از رابطه 8 گاف نواری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول 5 آورده شده‌اند.

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad 8$$

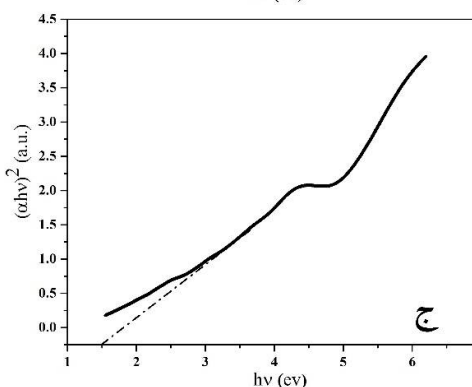
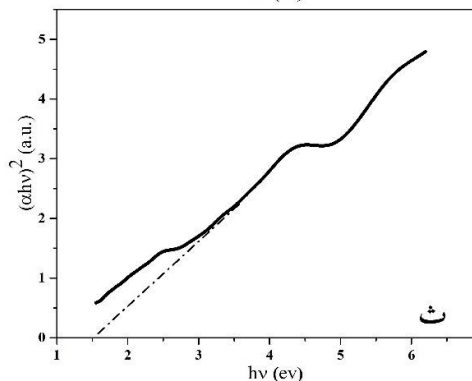
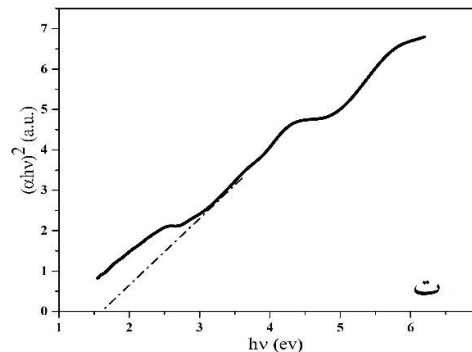
در رابطه 8، h ثابت پلانک، c سرعت نور در خلأ، λ طول موج پیشینه شدت نشری و E_g گاف نواری می‌باشد. همان‌طوری که نتایج جدول 5 نشان می‌دهد تمامی نمونه‌ها گاف نواری در محدوده 2/1 (ev) دارند که مشخص می‌کند نمونه‌ها نیم‌رسانا می‌باشند. این ویژگی BFO کاربرد فراوانی در اثر فوتوکاتالیستی دارد [30].



شکل 8. طیف فوتولومینسانس نمونه‌های پخت شده در دماهای (الف) 600، (ب) 650، (پ) 700، (ت) 750، (ث) 800 و (ج) 850°C.

جدول 5. نتایج گاف نواری نمونه‌های تهیه شده در دماهای پخت مختلف

دمای پخت (°C)	λ (nm)	E_g (ev)
600	601	2,063
650	596	2,081
700	596	2,081
750	593	2,091
800	597	2,077
850	597	2,077



شکل 7. نمودارهای $(\alpha hv)^2$ برحسب hv نمونه‌های پخت شده در دماهای (الف) 600، (ب) 650، (پ) 700، (ت) 750، (ث) 800 و (ج) 850°C.

جدول 4. نتایج گاف اپتیکی نمونه‌های تهیه شده در دماهای پخت مختلف.

دمای پخت (°C)	E_g (ev)
600	1,94
650	1,97
700	1,89
750	1,63
800	1,52
850	1,50

نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا نانوذرات فریت بیسموت (BiFeO_3) در دماهای پخت 600، 650، 700، 750، 800 و 850°C با زمان پخت 60 دقیقه به روش سل-ژل تهیه شدند. سپس خواص ساختاری و نوری آنها مورد بررسی قرار گرفت. از بررسی های ساختاری انجام شده بر روی آنها مشخص شد نمونه ها دارای ساختار پرووسکایت هستند. همچنین بیشترین درصد فاز مربوط به فریت بیسموت BFO با دمای پخت 650°C است. همچنین نوع و درصد ناخالصی در کاهش گاف اپتیکی تأثیرگذار است. محدوده گاف اپتیکی به دست آمده به روش تاک نمونه های ساخته شده در محدوده $1.50-1.94\text{ eV}$ است و با طیف فوتولومینسانس در محدوده $2.063-2.091$ است که با کار دیگران که روش ساخت آن مشابه با کار ما است سازگاری خوبی دارد ($1.45-2.08\text{ eV}$). همچنین گاف اپتیکی فریت BFO خالص ساخته شده توسط دیگران به روش هیدروترمال در محدوده $1.97-2.12$ است که اختلافی بسیار جزئی با کار ما دارد که این اختلاف ناشی از وجود ناخالصی در نمونه است. همچنین از بررسی خواص نوری نمونه ها مشخص شد که نمونه ها نیم رسانا می باشند.

مرجع ها

[1] س.ا. موسوی قهفرخی، ن. حیدری، م. زرگر شوشتری، بررسی نسبت مولی اسیدسیتریک بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی الکتریکی نانو ساختارهای $\text{SrNi}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$. مجله پژوهش سیستم های بس ذره ای، 11 (1395) 35-48.

[1] S.E. Mousavi Ghahfarokhi, N. Heidary, M. Zargar Shoushtari, Investigating molar ratio of citric acid on the structural, magnetic and dielectric properties of $\text{SrNiFe}_{16}\text{O}_{27}$ nanostructures, *Journal of*

Research on Many-body Systems **6** (2016) 35-48.

[2] W. Eerenstien, N.D. Mathur, J.F. Scott, Multiferroic and magnetoelectric materials, *Journal of Natural Materials* **442** (2006) 759-765.

[3] F. Kubel, H. Schmid, Structure of a ferroelectric and ferroelastic mono domain crystal of the perovskite BiFeO_3 , *Journal of Acta Crystallography* **B46** (1990) 698-702.

[4] م. رضایی، د. ثانوی خشنود، ا. دهقان، بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت بیسموت با جانشانی دوگانه لانتانیوم و ایتیم، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، 3 (1395)، 563-572.

[4] M. Rezaee, D. Sanavi Khoshnud, E. Dehghani, Investigating structural and magnetic nanoparticles of the bismuth ferrite with co-doped La and Y, *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* **3** (2016) 567-572.

[5] C. Gustau, J.F. Scott, Physics and application of bismuth ferrite, *Journal of Advanced Materials* **21** (2009) 2463-2485.

[6] J.P. Velev, S.S. Jaswal, E.Y. Tsymlal, Multi-ferroic and magnetoelectric materials and interfaces, *journal of Philosophical Transactions of the Royal Society A* **369** (2011) 3069-3097.

[7] م.ح. بصیری، تأثیر افزودن عنصر لانتانیوم بر ویژگی های ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی نانوذرات تولید شده فریت بیسموت به روش هم رسوبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، (1391).

[7] M.H. Basiri, The effect of adding an element La on the structural, electric and manetic parpred bismuth ferrite nanoparticles by a co-precipitation method, *Master Thesis, Technology University of Shiraz* (2012).

[8] H. Schmid, Multi-ferroic magneto electrics, *Ferro* **162** 1 (1994) 317-338.

- bismuth nanoparticles (BFO) doped with Ni prepared by a microwave, *Master Thesis, Technology University of Shahroud* (2016).
- [15] L. Trif, G. Tolnai, I. Tolnai, E. Kalman, Preparation and Characterization of Hexagonal W-type Barium Ferrite Nanoparticles, *Journal of Progress in Colloid and Polymer Science* 135 (2008) 38-43.
- [16] ز. شریفی، س.ا. موسوی قهفرخی، م. زرگر شوشتری، بررسی تأثیر زمان پخت بر ویژگی‌های مغناطیسی و ساختاری نانوذرات فریت اسپینلی سرب $PbFe_2O_4$. مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، ویژه نامه اول (1394)، 51-43.
- [16] Z. Sharifi, S.E. Mousavi Ghahfarokhi, M. Zargar Shoushtari, Investigating the effect of annealing temperature on the structural and magnetic properties of lead spinel ferrite nanoparticles ($PrFe_2O_4$), *Journal of Research on Many Body Systems, First special letter* (2015) 43-51.
- [17] س.ا. موسوی، ف. حمل‌زاده احمدی، م. زرگر شوشتری، تأثیر نسبت مولی اسید سیتریک بر خواص ساختاری، مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوساختار هگزافریت استرانسیوم نوع-Y ($Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$). مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران 4، سال بیست و پنجم (1396) 895-904.
- [17] S.E. Mousavi Ghahfarokhi, F. Hamalzadeh Ahmadi, M. Zargar Shoushtari, T effect of molar ratio of citric acid on the structural, magnetic and dielectric Y-type strontium hexaferrite ($Sr_2Co_2Fe_{12}O_{22}$), *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* 3 (2017) 895-904.
- [18] R. Palai, R.S. Katiyar, H. Schmid, P. Tissot, S.J. Clark, J. Robertson, S.A. T. Redfern, G. Catalan, J.F. Scott, β phase and γ - β metal-insulator transition in multiferroic $BiFeO_3$, *PHYSICAL REVIEW B* 77, 014110 (2008).
- [19] ر. صافی نجف‌آبادی، سنتز به‌روش شیمیایی و بررسی خواص ساختاری، الکتریکی و مغناطیسی نانوبلورهای مولتی [9] س. محمدی، بررسی خواص ساختاری، مغناطیسی و الکتریکی نانوذرات فریت بیسموت BFO آلاییده شده با عنصر گادولونیوم سنتز شده به‌روش هم‌رسوبی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، (1392).
- [9] S. Mohammadi, Investigating structural, magnetic and electric bismuth ferrite nanoparticles (BFO) doped with Gd synthesized by a co-precipitation method, *Master Thesis, Technology University of Shiraz* (2013).
- [10] J. Wang, J.B. Neaton, H. Zheng, V. Nagarajan, S.B. Ogale, B. Liu, D. Viehland, V. Vaithyanathan, D.G. Schlom, U.V. Waghmare, N.A. Spaldin, K.M. Rabe, M. Wuttig, R. Ramesh, Epitaxial $BiFeO_3$ multiferroic thin film heterostructures, *Mag. Sci.* 299 (2003) 1719-1722.
- [11] B.S. Soram, B.S. Ngangom, H.B. Sharma, Effect of annealing temperatures on the structural and optical properties of sol-gel processed nanocrystalline $BiFeO_3$ thin film, *Journal of Thin Films* 524 (2012) 57-61.
- [12] M. Sakar, S. Balakumar, P. Saravanan, S.N. Jaisankar, Annealing temperature mediated physical properties of bismuth ferrite ($BiFeO_3$) nanostructures synthesized by a novel wet chemical method, *Materials Research Bulletin* 48 (2013) 2878-2885.
- [13] Z. Lin, W. Cai, W. Jiang, C. Fu, C. Li, Y. Song, Effects of annealing temperature on the microstructure, optical, ferroelectric and photovoltaic properties of $BiFeO_3$ thin films prepared by sol-gel method, *Ceramics International* 39 (2013) 8729-8736.
- [14] ع. زارع، م. ایزدی، م. قاضی، بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات بیسموت BFO آلاییده با نیکل تهیه شده به‌روش مایکروویو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود (1395).
- [14] A, Zaregh, M. Izadi, M. Ghazi, Investigating structural, and magnetic

- [24] S. Ghosh, S. Dasgupta, A. Sen, H.S. Maiti, Low-Temperature Synthesis of Nanosized Bismuth Ferrite by Soft Chemical Route, *Journal of the American Ceramic Society*, **88** 5 (2005) 1349–1352.
- [25] M. Muneeswaran, P. Jegatheesan, N.V. Giridharan, Synthesis of nanosized BiFeO₃ powders by co-precipitation, *Journal of Experimental Nano science* (2012) 1-6.
- [26] S. Farhadi, M. Zaidi, Bismuth ferrite (BiFeO₃) nanopowder prepared by sucrose-assisted combustion method: A novel and reusable heterogeneous catalyst for acetylation of amines, alcohols and phenols under solvent-free conditions, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* **299** (2009) 18–25.
- [27] م. خانلری، ک. نعمتی آرا، ع. حمیدی راد، ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی لایه‌های نازک ZnS تهیه شده به دو روش متفاوت PVD و اسپری پایرولیزر، مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، دوره ششم (1395)، 15-21.
- [27] M. Khanlari, K. Neamati Ara, A. Hamidi Rad, Structural, optic properties of ZnS thin films prepared with two different methods of PVD and Spray pyrolysis, *Journal of Research on Many-body Systems* **6** (2016) 15-21.
- [28] S. Irfan, Y. Shen, S. Rizwan, H.C. Wang, S.B. Khan, C.W. Nan, Band-Gap engineering and enhanced photocatalytic activity of Sm and Mn doped BiFeO₃ nanoparticles, *Journal of the American Ceramic Society* (2016) 1-9.
- [29] F. Nin, T. Gao, N. Zhang, Z. Chen, Q. Huang, L. Qin, X. Sun, Y. Huang, Hydrothermal synthesis of BiFeO₃ nanoparticles for visible light photocatalytic applications, *Journal of nanoscience and nanotechnology* **15** (2015) 9693-9698.
- [30] S. Mohan, B. Subramanian, I. Bhaumik, P.K. Gupta, S.N. Jaisakar, Nanostructured Bi_(1-x)Gd_(x)FeO₃—a multi ferroic photo catalyst on its sunlight driven photo catalytic activity, *journal of RSC Advances* **4** (2014) 16871-16878.
- فروبیکی BiFeO₃، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، (1395).
- [19] R. Safi Najafabadi, Synthesis by a Chemical method a investigating structural, electric and magnetic Nanocrystals multiferroic BiFeO₃ *Master Thesis, Technology University of Shiraz* (2016).
- [20] م. رنجبر، م. ا. قاضی، م. ایزدی فرد، بررسی اثر دمای خشک کردن بر ویژگی‌های ساختاری، دی‌الکتریک، اپتیکی و مغناطیسی نانوذرات BiFeO₃ تولید شده به روش سل-ژل، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و ششم (1397) 251-260.
- [20] M. Ranjbar, E. Ghazi, M. Izadifard, Investigating the effect drying temperature on the structural, dielectric, optic and magnetic properties BiFeO₃ nanoparticles prepared by a sol-gel method, *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy* **3** (2018) 251-260.
- [21] A. Yakubu, Z. Abbas, N.A. Ibrahim, M. Hashim, Effect of Temperature on Structural, Magnetic and Dielectric Properties of Cobalt Ferrite Nanoparticles Prepared via Co-precipitation Method, *Physical Science International Journal* **8** 1 (2015) 1-8.
- [22] م. حاصل‌پور، بررسی خواص ساختاری و مغناطیسی نانوذرات فریت بیسموت BiFeO₃ تهیه شده به روش هم‌رسوبی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان (1394).
- [22] M. Hasepoor, Investigating structural and magnetic bismuth ferrite nanoparticles BiFeO₃ prepared by a co-precipitation method, *Master Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman* (2015).
- [23] R. Andoulsi, K. Horchani-Naifer, M. Ferid, Structural and electrical properties of calciumsubstituted lanthanum ferrite powders, *journal of Powder Technology* **230** (2012) 183-187.