

رشد و مشخصه‌یابی تک‌بلور پتاسیم دی هیدروژن فسفات (KDP) و امکان‌سنجی تولید هم‌هنگ دوم لیزر Nd:YAG

حدیث چراغی*، مجید آقاباباگلی، محسن یزدان‌مهر و حسن احمدوند

مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی نوین، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

پست الکترونیکی: hadischeraghi@mut-es.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱)

چکیده:

تولید هم‌هنگ دوم در لیزرهای حالت جامد، همواره بخش مهمی از اپتیک غیرخطی است که توسط برخی بلورها همانند بلور پتاسیم دی هیدروژن فسفات (KDP) انجام می‌شود. در این پژوهش، تک‌بلور KDP به روش رشد از فاز محلول با تبخیر حلال در دمای ثابت ۴۵ درجه با استفاده از تجهیزات کنترل و تثبیت دمایی دقیق، رشد داده شد. تک‌بلور رشد داده شده، توسط دستگاه بلورنگاری پرتو ایکس به روش لائو، جهت‌یابی شد و تک‌بلوری آن مورد تأیید قرار گرفت. تشکیل فاز بلورین و عدم حضور فاز اضافی از نمونه بلور خردایش شده، با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD)، مورد بررسی قرار گرفت. بیناب‌نمایی تبدیل فوریه مادون‌قرمز (FTIR)، حضور پیوندهای خمشی، کششی و سایر پیوندها را تأیید کرد. با استفاده از بیناب‌نمایی بازتاب پخششی (DRS) مقدار گاف نواری برای نمونه رشد داده شده، ۴/۱۲ الکترون‌ولت به دست آمد. بیناب عبور نشان داد این تک‌بلور در ناحیه طول موجی ۲۰۰-۸۰۰ نانومتر، دارای شفافیت بالاتر از ۴۵٪ است. تعیین محور اپتیکی بلور و زاویه تطبیق فاز، بر اساس نتایج الگوی پراش لائو تعیین و بلور مورد نظر در آن راستا توسط گونیامتر دوران داده و برش داده شد. سپس آزمون تولید هم‌هنگ دوم با استفاده از لیزر Nd:YAG با طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر انجام و نور سبز خروجی با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم دی هیدروژن فسفات (KDP)، تک‌بلور غیرخطی، تولید هم‌هنگ دوم (SHG)، لیزر Nd:YAG

۱. مقدمه

مورد مطالعه قرار گرفته است [۲، ۳]. هم‌هنگ دوم که دو برابر شدن بسامد نیز گفته می‌شود، یک فرآیند نوری غیرخطی است که در آن فوتون‌ها با یک ماده غیرخطی برخورد می‌کنند و فوتون‌های خروجی با دو برابر انرژی و یا به عبارتی دو برابر بسامد فوتون‌های اولیه، از بلور خارج می‌شوند [۴].

برای مثال، لیزر Nd:YAG در محدوده مادون قرمز و طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر کار می‌کند و تولید هم‌هنگ دوم برای این لیزر منجر به تولید پرتو تابشی با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر در محدوده بیناب مرئی یعنی نور سبز می‌شود. اما نکته قابل توجه آن است که، تولید هم‌هنگ دوم در بلورهایی اتفاق می‌افتد که دو محوری و ناهمسانگرد هستند.

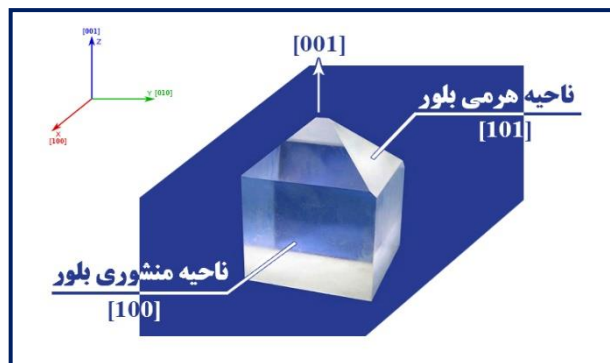
بلور پتاسیم دی هیدروژن فسفات که به اختصار KDP نامیده می‌شود در دسته مواد اکسیدی قرار دارد و از نمکی قابل انحلال در آب تشکیل شده است [۱]. این بلور از جمله بلورهای غیرخطی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد شامل شفافیت در ناحیه وسیعی از بیناب الکترومغناطیسی، آستانه تخریب بالا در برابر تابش لیزر قدرتمند (10 GW.cm^{-2}) و بازده غیرخطی نسبتاً زیاد است و از طرفی قابلیت رشد در ابعاد بزرگ دارد. این بلور در چند دهه اخیر به علت کاربردهای مهم نظیر تولید هم‌هنگ دوم، کیوسوییچ‌ها (Q-switch) و پیزوالکتریک به طور گسترده

می‌گذارند [۱۲]. از لحاظ ساختاری، بلور KDP دارای سه فاز در بازه‌های دمایی مختلف است. در بازه دمایی ۱۵۰- تا ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد فاز پارالکتریک در گروه فضایی چهارگوشه (گروه نقطه‌ای $T\bar{4}2d$) تشکیل می‌دهد. این بلور در دمای کمتر از 150°C دستخوش تغییر فاز شده و به فاز فروالکتریک در گروه فضایی راست‌لوزی (گروه نقطه‌ای $Fdd2$) می‌رود. در دمای 190°C و نیز تا حدود دمای 400°C ، این بلور تغییر ساختار داده و به شکل مونوکلینیک (گروه نقطه‌ای $P2_1/c$) درمی‌آید [۱۳].

جدول ۱، شامل برخی از مشخصات فیزیکی تک‌بلور KDP مطابق با استانداردهای بیان شده در منابع موجود، است. در دمای اتاق تک‌بلور KDP دارای ساختار چهارگوشه است. در این ساختار دو ناحیه رشد وجود دارد: یک ناحیه منشوری که شامل صفحه (۱۰۰) و یک ناحیه هرمی که شامل صفحه (۱۰۱) است [۱۴].

به طور کلی، فرآیند رشد تک‌بلور از سه فاز بخار، مذاب و محلول انجام پذیر است که در میان آن‌ها، تک‌بلور KDP به روش رشد از فاز محلول قابل تولید است. همچنین در میان روش‌های مختلف رشد از فاز محلول، به لحاظ قابلیت انحلال بالا و ضریب حلالیت مثبت و کوچک KDP، روش تبخیر در دمای ثابت به کمک بلور دانه، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵، ۱۶].

در این روش، به دلیل اختلاف سرعت بین تبخیر شدن حلال و ماده حل شونده ابتدا محلول فوق اشباع شده و سپس دمای محلول در حالت فوق اشباع نگه داشته می‌شود و در نهایت با ورود بلور دانه، تک‌بلور رشد می‌کند. بنابراین، نرخ رشد با کنترل میزان تبخیر تنظیم می‌شود. شرایط رشد شامل پایداری حرارتی در حدود $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ و سرعت تبخیر چند میلی‌متر مکعب در ساعت است [۱۷]. در این روش، سامانه کنترل‌کننده حرارتی نقش مهمی در سرعت رشد ایفا می‌کند. در پژوهش حاضر، رشد تک‌بلور KDP با استفاده از روش تبخیر در دمای ثابت به کمک بلور دانه، انجام شده است.



شکل ۱. نواحی و صفحات بلوری تک‌بلور KDP.

منظور از دومحوری بودن این است که دو ضریب شکست متفاوت ناشی از محیط ناهمسانگرد (ضریب شکست عادی و غیرعادی) در بلور وجود دارد. در میان بلورهای گوناگون، که ویژگی‌های بالا را داراست، تک‌بلور KDP با تولید هماهنگ دوم قابلیت تبدیل طول موج 1064 نانومتر لیزر Nd:YAG را به طول موج مرئی 532 نانومتر دارد که می‌تواند در حوزه‌های پزشکی، صنعتی و نظامی، پردازش مواد و منابع نوری برای پردازش لیزری به کار گرفته شود [۶]. همچنین در بسیاری از زمینه‌های ذخیره‌سازی اطلاعات، ارتباطات زیردریایی، کنترل از راه دور، زیست‌فناوری، پرینتر لیزری، کاربردهای پزشکی و بیناب‌نمایی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷، ۸]. بر این اساس محققین مختلف مطالعات گسترده‌ای بر روی رشد و بهینه‌سازی و فرآوری آن انجام داده و گزارش‌های مختلفی نیز در این زمینه ارائه نموده‌اند [۹-۱۱]. با وجود پیشرفت‌های چشمگیری که برای رشد تک‌بلورهای KDP باکیفیت قابل قبول در داخل کشور صورت گرفته، اما هنوز نیاز به استفاده از روش‌ها و به کارگیری مراقبت‌های لازم جهت بهبود کیفیت بلور وجود دارد. لذا به کارگیری دستگاه رشد تک‌بلور مناسب و کنترل عوامل مؤثر بر رشد، به منظور دستیابی به تک‌بلور با ابعاد بزرگ و بدون نقص، از مهم‌ترین برنامه‌های این حوزه در داخل کشور است. زیرا عوامل مؤثر بر رشد، مانند سازوکار رشد تک‌بلور KDP، دستگاه رشد، مراقبت‌های حین رشد، دما و وجود ناخالصی به طور مستقیم بر سرعت رشد، ابعاد تک‌بلور و کیفیت آن تأثیر

جدول ۱. برخی از مشخصات فیزیکی بلور KDP [۵].

گاف نواری (eV)	ثابت‌های شبکه Å	ساختار بلوری	چگالی (g/cm ³)	جرم مولکولی (g/mol)	فرمول شیمیایی
۴/۱۷	a = b = ۷/۴۵۲ c = ۶/۰۵۹	Tetragonal , I42d	۲/۳۹۹	۱۳۶/۰۸۶	HK ₂ PO ₄

۲. فرآیند آزمایشگاهی:

۲.۱. دستگاه رشد تک‌بلور:

این دستگاه شامل سه بخش است: الف) حمام آب گرم و محفظه رشد (که معمولاً از جنس شیشه است)، ب) سامانه کنترل‌کننده حرارتی، ج) میله نگهدارنده بلور متصل به موتور چرخنده جهت چرخش بلور در حین رشد و تجهیزات جانبی همانند همزن (جهت یکنواخت نمودن دمای حمام)، درپوش محفظه رشد (جهت جلوگیری از ارتباط مستقیم محلول با هوای بیرون) و درپوش حمام (جهت جلوگیری از تبخیر بی رویه آب حمام و نیز جلوگیری از هدر رفتن دمای حمام) که در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۸].

۲.۲. تولید و آماده‌سازی بلور دانه:

یکی از عوامل مهم در کیفیت تک‌بلور رشد یافته، استفاده از بلور دانه مناسب برای رشد است. برای این منظور محلول فوق اشباع KDP خالص بعد از حرارت و انحلال کامل پودر، درون بشر و در جای ساکن و بدون تنش در دمای اتاق و یا دمای مشخص قرار داده شد. بعد از گذشت سه روز بلور دانه‌هایی در کف ظرف متبلور شد. از میان بلور دانه‌های حاصل، بلور دانه‌های شفاف و عاری از ترک و کدری را جدا کرده و بعد از برش و صیقل‌کاری، آماده استفاده در محفظه اصلی رشد گردید.

۲.۳. رشد تک‌بلور:

رشد تک‌بلور KDP، در ابتدا نیازمند تهیه محلول فوق اشباع KDP است که مرحله مهم و اساسی در فرآیند رشد محسوب می‌شود. اگر محلول در شرایط فوق اشباع نباشد، بلور تبلور مطلوبی ندارد و بلور دارای دررفتگی و ریز ترک می‌شود. پس برای به حداقل رساندن نقص‌ها و تشکیل ناهمگنی، محلول

باید در نقطه فوق اشباع باشد.

برای این منظور آب دو بار تقطیر برای رشد KDP باید از لحاظ pH خنثی و از لحاظ رسانندگی الکتریکی تقریباً صفر باشد. همچنین، دمای حلالیت برای بلور KDP از ۱۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شود [۱۲]. برای تهیه محلول نیاز به رابطه حلالیت است. رابطه حلالیت مواد با دما رابطه خطی نیست و با شرایط محیط آزمایش، تغییر می‌کند. در آزمایش حاضر مقدار ماده از رابطه تجربی زیر به دست آمده است:

$$S = 4/04 \times 10^{-3} T^2 + 0/365 T + 13/7 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، S مقدار گرم پودر KDP مورد نیاز برای تهیه محلول فوق اشباع در دمای دلخواه T در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب است [۱۲].

علاوه بر این رابطه، رسم نمودار حلالیت نیز به فرآیند رشد در شرایط فوق اشباع کمک خواهد کرد.

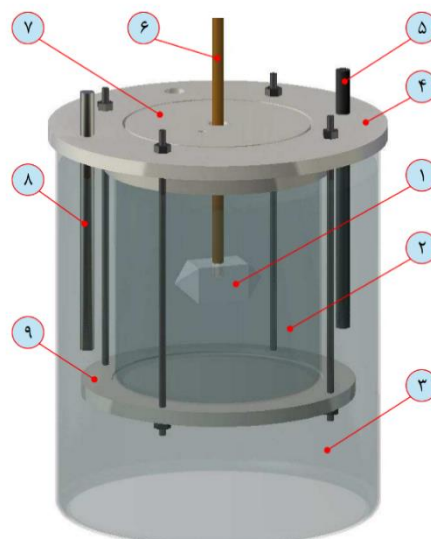
در شکل ۴، منحنی ۱ نمودار حلالیت KDP، و منحنی ۲ نمودار فوق اشباعی آن در آب است. همچنین قسمت الف، ناحیه پایداری، قسمت ب، ناحیه ناپایداری و قسمت پ، ناحیه نیمه پایداری است [۱۹]. فوق اشباعی در عرض منطقه نیمه پایدار انتخاب می‌شود. در این منطقه است که رشد تک‌بلورها اتفاق می‌افتد. بنابراین تهیه محلول فوق اشباع مرحله مهم و اساسی در فرآیند رشد است. بعد از اضافه کردن پودر KDP در حجم آب دو بار تقطیر، محلول حاصل در دمایی بالاتر از دمای T قرار داده شده تا پودر به وسیله همزن، کاملاً در حلال حل شود. در نهایت محلول شفاف، فاقد رسوبات و KDP حل نشده حاصل شد. در این مرحله، تمام محلول در دمای حدوداً ۲۰ درجه سانتی‌گراد بالاتر از دمای فوق اشباعی، به مدت ۲۴-۴۸ ساعت قرار داده شد تا ریز بلورک‌های احتمالی موجود در محلول به طور کامل حل شود.

بعد از انحلال کامل مواد و اطمینان از فوق اشباع بودن محلول، بلور دانه به کمک میله شیشه‌ای وارد محلول گردید و به وسیله موتور چرخاننده شد. سرعت چرخش بلور دانه در فرآیند رشد بسیار حائز اهمیت است. بنابراین طی آزمایش‌های مختلف، سرعت‌های ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ دور در دقیقه برای چرخش بلور دانه مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج آزمایش‌ها، بلوری که با سرعت ۶۰ دور در دقیقه چرخانده شده بود، از لحاظ شفافیت، کیفیت مطلوبی داشته و بلور عاری از ترک بود. به همین دلیل در این مقاله، فقط نتایج نمونه تک‌بلور رشد یافته با سرعت رشد ۶۰ دور در دقیقه ارائه شده است. بلور دانه بعد از ورود به محلول، با سرعت مذکور چرخانده شد. دمای محلول در طول فرآیند رشد، ۴۵ درجه سانتی‌گراد با پایداری دمایی $\pm 0.2\%$ ثابت نگه داشته شد. بعد از گذشت ۴ روز تک‌بلور رشد داده شد. همین آزمایش در دمای رشد ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲ درجه سانتیگراد نیز انجام شد. مجدداً طبق نتایج و بلورهای متبلور شده، بلوری که در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد رشد داده شد، عاری از ترک و دارای شفافیت مطلوبی بود که نتایج مشخصه‌یابی آن در بخش نتایج آورده شده است. روند رشد تک‌بلور در این مدت زمان در شکل ۵، نشان داده شده است.

بعد از خارج کردن تک‌بلور به منظور مشخصه‌یابی‌های مربوط به تولید هماهنگ دوم، بلور باید در زاویه تطبیق فاز، برش داده شود. به همین منظور بلور رشد یافته، با استفاده از دستگاه بلورنگاری به روش پراش پرتو ایکس لائوه، جهت‌یابی شد که در ادامه به بررسی آن خواهیم پرداخت. پس از بلورنگاری به بلور تعیین شد. این محور در زاویه $59/8$ درجه نسبت به محور Z تک‌بلور قرار دارد. بعد از برش نهایی، قطعه‌ای به صورت مکعب مستطیل به اندازه $10/5 \times 12 \times 13$ میلی‌متر مکعب به دست آمد (شکل ۶. ب).

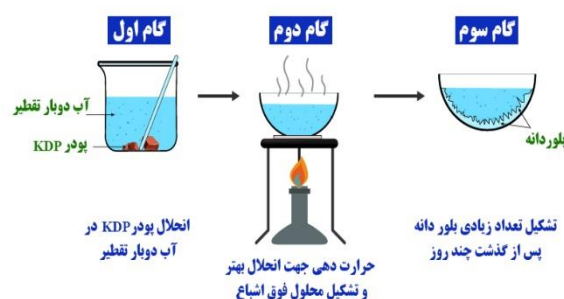
۳. نتایج و بحث:

جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی تک‌بلور رشد داده شده، مشخصه‌یابی‌های مختلف فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

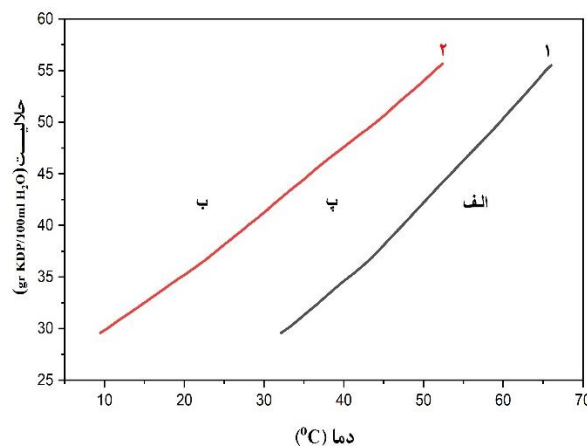


شکل ۲. طرح‌واره‌ای از محفظه دستگاه رشد بلور مورد استفاده در این پژوهش: (۱) تک‌بلور KDP، (۲) محلول KDP، (۳) حمام آب، (۴) درپوش حمام آب، (۵) المان حرارتی، (۶) میله نگهدارنده تک‌بلور، (۷) درپوش محفظه رشد، (۸) ترموکوپل، و (۹) نگهدارنده محفظه رشد.

مراحل تشکیل بلور دانه KDP



شکل ۳. مراحل تشکیل بلور دانه KDP.



شکل ۴. نمودار حلالیت ماده KDP در آب [۱۹].

۳.۱. بلورنگاری پراش پرتو ایکس لاهه:

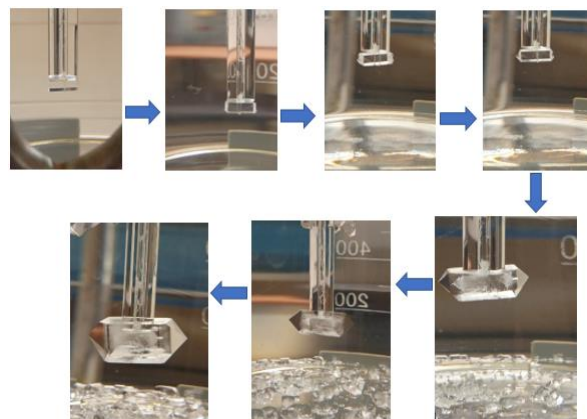
به‌منظور بررسی تک‌بلوری، مشخص نمودن جهت‌های وجوه بلور، محور بلور، زوایا و مکان برش و نیز مشخص نمودن جهت بلوری مورد نیاز، از دستگاه پراش پرتو ایکس به روش لاهه مدل (X-ray crystal analyzer-XJ10-60N model, ASEWARE Inc.) استفاده شد. در این مشخصه‌یابی، از نقاط مختلف بلور در راستای نوک هرم تک‌بلور که انتظار می‌رود در جهت $\{001\}$ رشد کرده باشد، الگوی پراش لاهه گرفته شد. نتایج نشان داد برای نقاط مختلف در یک راستای ثابت عمود بر هر وجه، الگوهای پراش لاهه ثابت باقی می‌مانند. این نتیجه نشان‌دهنده تک‌بلوری بودن کامل نمونه رشد داده شده و عدم وجود حوزه‌های مختلف با جهت‌گیری بلورین متفاوت و همچنین عدم وجود دوقلوژی است. شکل ۷، الگوی پراش لاهه گرفته شده از تک‌بلور متبلور شده را نشان می‌دهد.

پس از تایید تک‌بلوری، تحلیل این الگوی پراش با کمک نرم‌افزار Oreint Express انجام شد. طبق انتظار، جهت بلوری تک‌بلور متبلور شده در راستای هرم $\{001\}$ است. انطباق الگوی پراش لاهه تک‌بلور رشد داده شده با الگوی استاندارد موجود در نرم‌افزار در شکل ۸ نشان داده شده است.

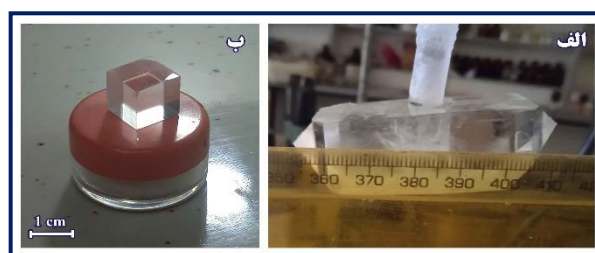
پس از تحلیل دقیق الگوی پراش لاهه، دوران تک‌بلور توسط گونیامتر به جهت مورد نظر با زاویه $59/8$ درجه نسبت به محور Z تک‌بلور انجام شد و سپس با استفاده از دستگاه سیم برش الماسه، برش داده شد. این قطعه به منظور تولید هماهنگ دوم آماده گردید.

۳.۲. پراش اشعه ایکس (XRD):

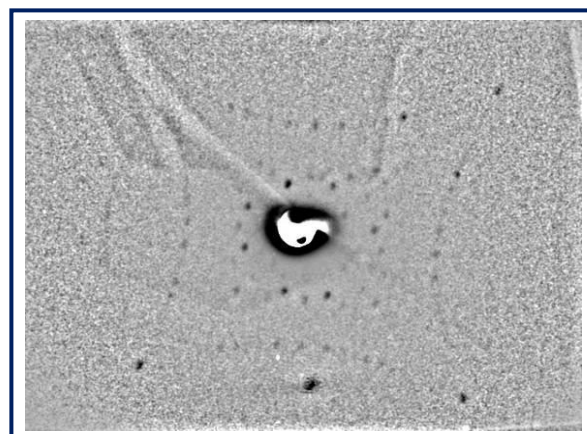
الگوهای پراش پرتو ایکس برای بخش کوچکی از تک‌بلور که به‌صورت پودر آماده شده بود، با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل Bruker D8-Advance Diffractometer، انجام شد. الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه بلور پودر شده، نشان می‌دهد که نمونه مورد نظر، تک فاز است و هیچ‌گونه فاز ثانویه‌ای ندارد. همچنین تطابق بسیار خوبی با کارت استاندارد شماره ۰۰۰۱-۹۶-۹۶ مربوط به ترکیب $K_2H_8P_4O_{16}$ با ساختار چهارگوشه و گروه فضایی $I\bar{4}2d$ دارد، (شکل ۹).



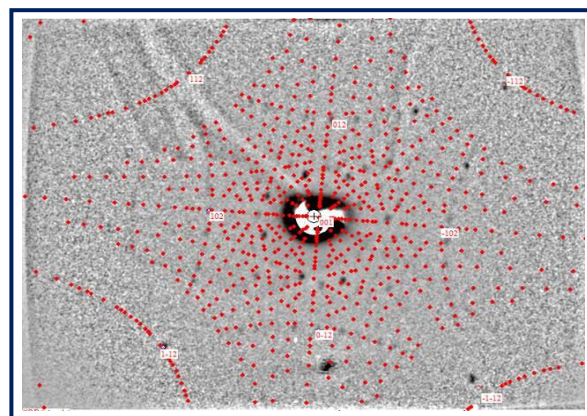
شکل ۵. روند رشد تک‌بلور KDP.



شکل ۶. الف. تک‌بلور KDP پس از رشد، ب. قطعه تک‌بلور برش داده شده KDP.



شکل ۷. الگوی پراش لاهه مربوط به تک‌بلور KDP رشد داده شده.



شکل ۸. الگوی پراش تحلیل شده و پراش داده شده توسط نرم‌افزار Oreint Express مربوط به تک‌بلور KDP.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، هر دو الگو، انطباق خوبی با هم دارند. جدول ۲، گروه‌های عاملی مختلف حاصل از بیناب‌نمایی مادون‌قرمز برای نمونه KDP رشد داده شده در این پژوهش و نمونه موجود در مقاله را نشان می‌دهد. در جدول ۲، چهار دره اصلی با جذب قوی که مهم‌ترین بسامدهای ارتعاشی آنیون یعنی PO_4^{3-} هستند، نشان داده شده است که به طور تقریبی ۹۹٪ به ضریب هماهنگ دوم در این تک‌بلور کمکی می‌کنند [۲۱].

۳.۴. سختی‌سنجی ویکرز

برای انجام سختی‌سنجی ویکرز، تک‌بلور به صورت قرص با سطحی صاف آماده شد. سپس قطعه به مدت ۱۰ ثانیه تحت تاثیر بار ۱۰۰ gr قرار گرفت و مقدار سختی با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

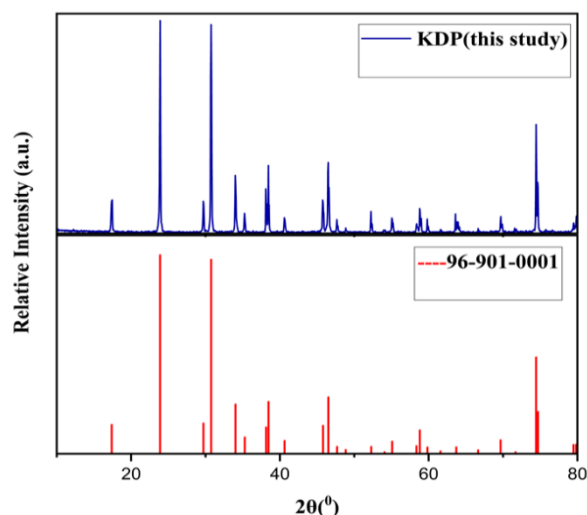
$$Hv = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، Hv (kg/mm^2) عدد سختی، P (kg) بار اعمالی بر روی نمونه و d (mm) طول قطر اثر اعمالی است [۲۲]. طبق این مشخصه‌یابی به ازای بار دندانانه گذار ۱۰۰ گرمی، مقدار سختی ۱۲۸ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع اندازه‌گیری شد که نشان‌دهنده مقاومت مکانیکی بالای تک‌بلور است. این مقدار سختی بزرگ، به فشار بالای مورد نیاز برای ایجاد در رفتگی همگن توسط دندانانه گذار در یک ناحیه فاقد در رفتگی نسبت داده می‌شود. از این‌رو، نیاز به فشار زیاد بر سطح بلور برای شکل‌گیری در رفتگی بر روی آن، نشان‌دهنده بلورینگی خوب تک‌بلور است [۱۱].

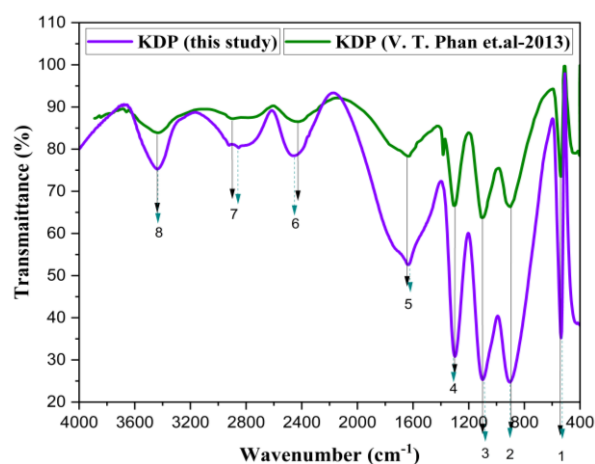
۳.۵. بیناب‌نمایی عبور نوری:

در این بخش، مشخصه‌یابی تک‌بلور رشد یافته را بعد از برش و پرداخت سطح، تحت تابش پرتو با طول‌موج ۲۰۰-۱۱۰۰ نانومتر قرار داده شد. بیناب‌عبوری بلور KDP در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، نمونه در تمام محدوده فرابنفش، مرئی و مادون قرمز نزدیک، شفافیت خوبی دارد. مقدار عبور نمونه مورد نظر، ۶۵٪ به‌دست آمد که در مقایسه با نتایج مقالات مختلف، شفافیت بلور مطلوب است [۱۱].



شکل ۹. الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به بلور خردایش شده KDP و هم‌خوانی آن با کارت استاندارد.



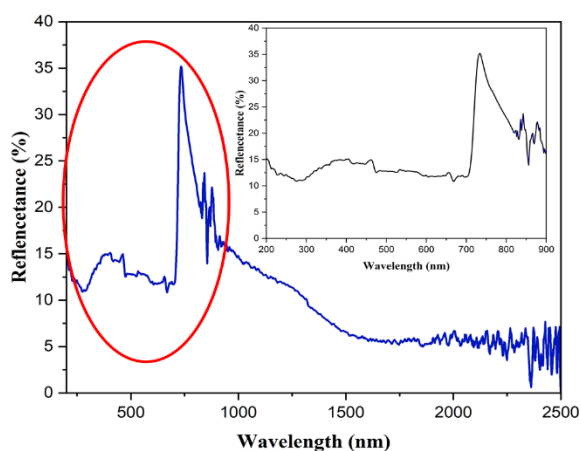
شکل ۱۰. مقایسه بیناب FTIR بلور KDP با مقاله [۲۱].

۳.۳. بیناب‌نمایی تبدیل فوریه مادون‌قرمز (FT-IR):

به منظور بررسی پیوندهای موجود در تک‌بلور رشد یافته، بلور توسط هاون عقیق سایش داده شد و در معرض تابش مادون‌قرمز در محدوده عدد موج 4000 cm^{-1} تا 400 cm^{-1} قرار گرفت. این بیناب دلالت بر وجود پیوندهایی مطابق با بیناب FT-IR استاندارد بلور KDP دارد. در بیناب‌نمایی FTIR، هر دره نماینگر یک پیوند در گروه‌های عاملی است. برای بررسی بیشتر، این بیناب با نتایج مقاله‌های مختلف مقایسه شد و نشان داد که انطباق خوبی با نتایج آن‌ها دارد [۲۰، ۲۱]. به اختصار نمودار یکی از این مراجع جهت مقایسه با بیناب بلور KDP متبلور شده در این پژوهش، در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۲. مقایسه پیوندهای موجود در تک‌بلور KDP رشد داده شده و نمونه موجود در مقاله [۲۱].

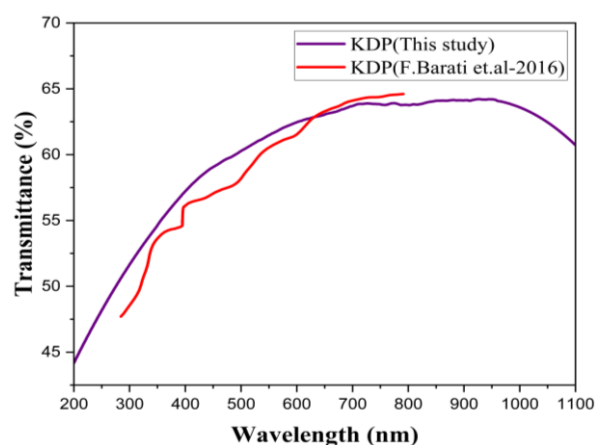
عدد نمایش داده شده بر روی نمودار	پیوندها	عدد موج (cm ⁻¹) در نمونه KDP	عدد موج (cm ⁻¹) در نمونه KDP موجود در مقاله [۲۱]
۱	ارتعاش خمشی OH-P-HO	۵۳۶/۲۰ (قوی)	۵۳۶/۲۹ (قوی)
۲	ارتعاش کششی H-O-P	۹۰۴/۸۰ (قوی)	۹۰۷/۴۳ (قوی)
۳	ارتعاش کششی P=O	۱۰۹۹/۹۹ (قوی)	۱۰۹۶/۳۴ (قوی)
۴	ارتعاش کششی P=O	۱۲۹۹/۳۲ (قوی)	۱۲۹۶/۰۷ (قوی)
۵	ارتعاش کششی O=P-OH	۱۶۳۵/۴۹ (متوسط)	۱۶۳۸/۱۰ (متوسط)
۶	ارتعاش کششی O=P-OH	۲۴۵۴/۹۶ (ضعیف)	۲۴۳۷ (ضعیف)
۷	ارتعاش کششی متقارن P-O-H	۲۷۹۸/۴۱ (خیلی ضعیف)	۲۸۱۱/۴۹ (خیلی ضعیف)
۸	ارتعاش کششی متقارن O-H	۳۴۳۹/۳۶ (خیلی ضعیف)	۳۴۳۸/۹۶ (خیلی ضعیف)



شکل ۱۲. بیناب بازتاب پخشی (DRS) مربوط به تک‌بلور KDP رشد داده شده.

در این رابطه، R درصد بازتاب، k ضریب جذب و s ضریب پراکندگی است. کمیت $F(R)$ در رابطه ۳، متناسب با ضریب جذب (α) است. در شکل ۱۳، نمودار بیناب جذب $F(R)$ بر حسب طول‌موج رسم شده است. در بیناب جذب، مقدار گاف نواری را می‌توان از طریق تعیین محل قطع خط مماس بر نمودار در لبه جذب اصلی (بیشترین شیب) با خط مماس بر دنباله نمودار (کمترین شیب)، و تبدیل طول موج به دست آمده به انرژی (رابطه ۴)، به دست آورد که در شکل ۱۳ با علامت پیکان مشخص شده است.

در شکل ۱۳، محل تقاطع بیشترین و کمترین شیب قله جذب مربوط به طول‌موج ۳۰۱ نانومتر است که با تبدیل طول‌موج به انرژی، گاف انرژی در بیناب جذب بلور KDP، برابر با ۴/۱۲ الکترون‌ولت به دست آمد و در تطابق با گاف انرژی بلور در مقالات مختلف است [۲۴].



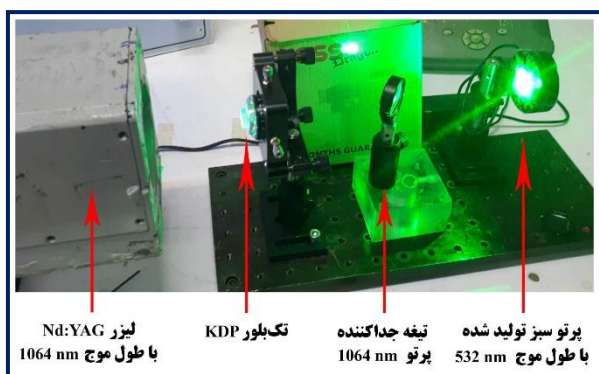
شکل ۱۱. مقایسه بیناب عبور تک‌بلور رشد داده شده در این پژوهش با بیناب عبور ارائه شده در مرجع [۱۱].

۳.۶. بیناب‌نمایی بازتاب پخشی (DRS)

بیناب‌نمایی بازتاب پخشی، به منظور بررسی خواص الکترونی، گاف انرژی و ارزیابی وجود نقص‌های نقطه‌ای ذاتی و غیرذاتی مورد استفاده قرار گرفته است. بیناب بازتاب پخشی تک‌بلور KDP، با استفاده از دستگاه اسپکترومتر UVvis-DRS مدل UV-۳۱۰۰ ساخت شرکت Shimadzu اندازه‌گیری شد. نمودار بیناب بازتاب پخشی در شکل ۱۲، نشان داده شده است. طبق نمودار بیناب بازتاب پخشی در شکل ۱۲، محدوده دارای بیشترین بازتاب برای محاسبه گاف نواری در ناحیه ۲۰۰ تا ۹۰۰ نانومتر قرار دارد.

به منظور بررسی بیشتر و محاسبه گاف نواری، با استفاده از تبدیل بیناب بازتاب پخشی به بیناب جذب از رابطه کوبلکا-مونک استفاده می‌شود [۲۳]:

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} = \frac{k}{s} \quad (3)$$

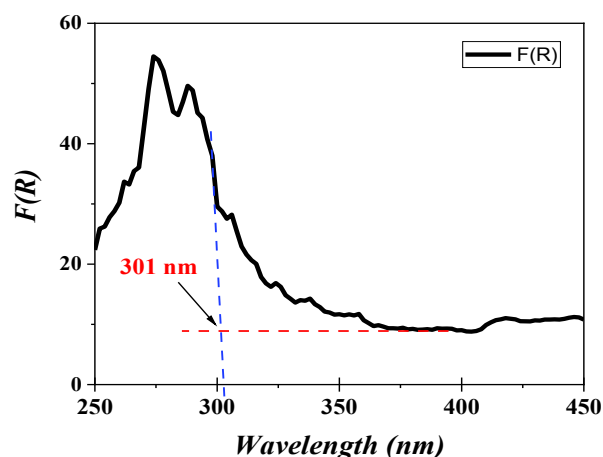


شکل ۱۴. هماهنگ دوم تولید شده توسط تک‌بلور KDP.

سپس به کمک بلورنگاری پراش پرتو ایکس لاهه، تک‌بلورین بودن آن تایید و جهت‌های بلوری در آن مشخص گردید. محاسبه زاویه تطبیق فاز بلور و تشخیص محور اپتیکی بلور و متعاقباً دوران و برش بلور در راستای مشخص، به منظور بررسی تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG از آن، انجام گردید. با استفاده از پراش پرتو ایکس، تشکیل فاز بلورین بررسی و ثابت‌های شبکه محاسبه شد. نتیجه نشان می‌دهد که ساختار و فاز موردنظر در دمای پایین تشکیل شده است. بیناب‌نمایی مادون‌قرمز (FTIR) حضور پیوندهای خمشی و کششی OH-P-HO و H-O-P و سایر پیوندها را تأیید کرد که مؤید تشکیل فاز بلور است. بیناب‌نمایی بازتاب پخششی (DRS) برای بلور KDP رشد داده شده، بررسی و گاف نواری به میزان ۴/۱۲ الکترون‌ولت به دست آمد. نتایج سنجش میکروسختی به ازای بار ۱۰۰ گرمی، مقدار سختی ۱۲۸ کیلوگرم بر میلی‌متر مربع به دست آمد که نشان می‌دهد بلور دارای مقاومت مکانیکی بالایی است. بیناب عبور این تک‌بلور با میزان عبور ۶۵٪ نشان داد که در ناحیه مرئی تا مادون‌قرمز، بلور دارای شفافیت مطلوبی است. در نهایت بعد از پرداخت سطح تک‌بلور تولید هماهنگ دوم از لیزر Nd:YAG با طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر و انرژی ۹۴ میلی ژول مورد بررسی قرار گرفت و نور سبز خروجی با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر مشاهده گردید.

قدردانی:

نویسندگان از تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی مالک اشتر و مرکز پژوهشی فیزیک رشد بلور، به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی تشکر و قدردانی می‌کنند.



شکل ۱۳. بیناب جذب بلور KDP به‌دست آمده از بیناب بازتاب پخششی به روش کوبلکا-مونک.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240(\text{eV})}{301(\text{nm})} = 4.12(\text{eV}) \quad (4)$$

۳.۷. تولید هماهنگ دوم:

به منظور بررسی تولید هماهنگ دوم، چیدمان اپتیکی مناسبی، طراحی و آماده گردید (شکل ۱۴). تک‌بلور تحت تابش لیزر Nd:YAG (دارای انرژی ورودی ۸۰ mJ در ۸ ns، بسامد ورودی ۱ Hz و طول‌موج تابش ۱۰۶۴ nm)، قرار گرفت. بعد از قرارگیری بلور در جایگاه موردنظر و تابش پرتو لیزر، نور سبز (با طول‌موج ۵۳۲ nm) مشاهده شد. این موضوع نشان‌دهنده تولید هماهنگ دوم توسط تک‌بلور KDP است. خروجی انرژی با ژول‌متر اندازه‌گیری شد. این مقدار حدوداً ۳ mJ بود که نشان‌دهنده بازده ۴ درصدی بلور است. با توجه به این‌که در این پژوهش امکان پس‌فرآوری (لیننگ، پرداخت و لایه‌نشانی لایه ضد بازتاب) برای بلور رشد یافته مقدور نبوده است، لذا اندازه‌گیری بازده خروجی از بلور خام (بلور فراوری نشده) انجام شده است. از این‌رو، در این مقاله تولید هماهنگ دوم یعنی تبدیل طول‌موج ۱۰۶۴ به ۵۳۲ نانومتر، تنها با مشاهده نور سبز خروجی و صرفاً اندازه‌گیری بازده به‌صورت کمی توسط ژول‌متر بررسی شده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تک‌بلور KDP به روش رشد از فاز محلول و در دمای پایین با روش تبخیر حلال در دمای ثابت، رشد داده شد.

مراجع

1. L Zhang, S Wang, T Li, L Zhu, and Z Ye , *Ceramics International* **50-7** (2024) 11756.
2. Y Hang, L Yuxin, D Ziqiang, Z Songlin, and Z. Chengyu, *Optics Express* **31-22** (2023) 35786.
3. H Sarvalishah, A H Rezvani, H Fakhraian, and H Jalily, *Iranian Journal of Physics Research* **13-3** (2019) 311.
4. V Dmitriev, G Gurzadyan, and D Nikogosyan, “*Handbook of nonlinear optical crystals*”, Springer, (2013).
5. W Tropf, T Harris, and M. J Thomas, "Optical materials: visible and infrared." *Electro-Optics Handbook* (2000).
6. M Qin, X Xu, G Yu, B Wang, and W Cheng, *Crystals*, **10-2** (2020) 108.
7. M. Shabani, H. Saghafifar, S. Nazem and R. Riahi-Madavar, *Second National Conference on Optics and Laser Engineering of Iran*, (2011) 150.
8. K Bennemann, “*Non-linear optics in metals*”, Oxford University Press, (1998).
9. Z De-Gao, T Bing, D Sheng-Ming, W Qing-Guo, Z Yan-Shuai, H Wan-Xia, and Y Tao, *Crystal Research Technology: Journal of Experimental Industrial Crystallography* **44-5** (2009) 500.
10. N Verezub, A Voloshin, V Manomenova, and A Prostomolotov, *Crystallography Reports* **63-2** (2018) 302.
11. F Barati and H R. Dizaji, *Optical Quantum Electronics* **48** (2016) 1.
12. A Rousta and H Rezagholipour-Dizji, *Iranian Physics Conference* (2014) 818.
13. T Fukami , *physica status solidi* **122.2** (1990) K117.
14. X Ren, D Xu, and D Xue, *Journal of Crystal Growth* **310** (2008) 2005.
15. V Roopa, R Kumari, *Materials Science, and E Journal* , **9** (2017) 90.
16. M Solanki, S Shinde, T Akhani, and B. B Parekh , *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **35-8** (2024) 558.
17. I Pritula and K Sangwal, “*Fundamentals of crystal growth from solutions*”, in *Handbook of crystal growth*, edition: Elsevier, (2015).
18. G Dhanaraj, K Byrappa, V Prasad, and M Dudley "Crystal growth techniques and characterization: an overview." Springer Handbook of Crystal Growth (2010).
19. H Sarvoalishah, A Rezvani, H. Fakhraeian and H. Jalili, *18th Iranian Optics and Photonics Conference and 4th Iranian Photonics Engineering Conference*, (2013) 151.
20. Fabrati, “*Growth of KDP crystal towards second harmonic production from solution and investigation of its physical properties*”, Faculty of Basic Sciences, Semnan University, (2014).
21. V Phan, T Do, T Ho, D Nguyen, *Optical and Quantum Electronics*, **50** (2018) 1.
22. Geels, Kay, et al. "Metallographic and materialographic specimen preparation, light microscopy, image analysis, and hardness testing" , West Conshohocken, ASTM international, (2007).
23. Frei, Roland W. 'Diffuse reflectance spectroscopy environmental problem solving'. CRC press, (2019).
24. N Rajesh, V Kannan, *Materials letters*, **52** (2002) 326.