



رشد بلور KDP در محلول آبی با افزودنی EDTA

حمید سروعلیشاه^{۱*}، عبدالحسین رضوانی^۱، حسین فخرائیان^۲، حامد جلیلی^۱

۱- گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

۲- گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه امام حسین(ع)، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۹۰/۹/۱۹، نسخه نهایی: ۹۰/۱۲/۱۵)

چکیده: استفاده از افزودنی EDTA به عنوان ناخالصی به محلول KDP راه مؤثری برای بالا بردن عرض منطقه‌ی نیمه پایداری محلول و در نتیجه بالا رفتن سرعت رشد است. EDTA در محلول رشد با تشکیل همبافت‌های قوی با فلزات سنگین مانند Al و Fe و Cr که در مواد شیمیایی تجاری همواره به عنوان ناخالصی وجود دارند، فعالیت‌های شیمیایی این یون‌ها را خنثی می‌کند. تأثیر یون‌های فلزی Cu^{2+} و Fe^{3+} و Al^{3+} بر رشد بلور KDP مورد بررسی قرار گرفت. بلورها به روش بلوردانه گذاری در محلول با غلظت معین و رشد خود بخودی در دمای اتاق تهیه شدند. طیف مرئی-فرابنفش بلور حاوی ناخالصی Al^{3+} افزایش ناخواسته‌ی جذب در ناحیه‌ی فرابنفش را نشان می‌دهد. افزایش جذب در این ناحیه بیشتر به دلیل جانشینی یون‌های Al^{3+} به جای فسفر به عنوان واحدهای مولکولی $(\text{AlO}_4)^{2-}$ در شبکه‌ی بلور KDP است. استفاده از افزودنی EDTA در محلول رشد علاوه بر کاهش جذب در ناحیه‌ی فرابنفش، باعث برابر شدن سرعت رشد بلور در تمام وجوه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بلور KDP؛ تولید هماهنگ دوم؛ سرعت رشد؛ رشد از محلول؛ ناخالص.

مقدمه

همجوشی با برنامه ICF رشد کنند [۳]. برای گسترش سیستم ICF فاکتورهای زیادی مانند کیفیت، اندازه، میزان دقیق خاصیت الکترواپتیکی اهمیت دارند. مهم‌ترین کارهای صورت گرفته در سال‌های اخیر حول این محور بوده است که چگونه می‌توان با حفظ کیفیت بلور سرعت رشد را افزایش و طول دوره‌ی رشد و هزینه‌های تمام شده‌ی رشد بلور را کاهش داد [۴]. در رشد بلور از محلول، به دلیل فوق اشباع بالا و هستک سازی، وضعیت محلول رشد بسیار ناپایدار است. بنابراین جلوگیری از هستک‌سازی به عنوان یک عامل مزاحم در فرایند رشد اهمیت بسیاری دارد [۵،۶]. برای به‌دست آوردن صفحات بزرگ KDP (کاربرد در لیزر همجوشی) افزایش سرعت رشد

KH_2PO_4 یا KDP یک بلور محلول در آب است و در دمای اتاق ساختار چارگوش دارد و خاصیت پیزوالکتریک از خود نشان می‌دهد [۱]. این بلور بیشتر برای تبدیل بسامد در لیزر به کار می‌رود و بسامد پرتوی لیزر در ناحیه‌ی فروسرخ را به ناحیه‌ای با انرژی بالاتر در فرابنفش جابجا می‌کند. در بلور KDP دو ناحیه‌ی رشد وجود دارند (شکل ۱) [۲]، ناحیه‌ی منشوری شامل صفحه‌ی (100) و ناحیه‌ی هرمی شامل صفحه (101).

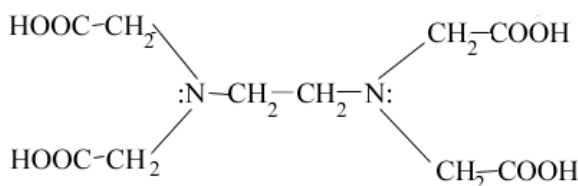
KDP ($\text{KD}_x\text{H}_{1-x}\text{PO}_4$) و KDP اخیراً به‌عنوان تنها بلورهای غیر خطی شناخته شده‌اند که می‌توانند در ابعاد بزرگ (۵۰-۸۰ cm) برای تبدیل بسامد در دستگاه‌های لیزر

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۷۱۸۴۱۱۴۶، پست الکترونیکی: sarvalishah@gmail.com

H^+ جایگزین می‌شوند و از رشد این سطح جلوگیری می‌کنند و تأثیر بازدارنده‌ای روی رشد بلور دارند.

یون‌های فلزی مثبت، جذب سطح (100) می‌شوند و از رشد این سطح به شدت جلوگیری می‌کنند. در اثر جذب سطحی یون‌های مثبت فلزی، شکل و شمایل بلور دراز و باریک می‌شود، به این دلیل که در سطح (101) یون K^+ بالاتر از یون $H_2PO_4^-$ قرار می‌گیرد و در سطح (100) دقیقاً برعکس این رخ می‌دهد، یعنی یون‌های $H_2PO_4^-$ بالاتر از K^+ قرار می‌گیرند. بنابراین سطح (101) دارای متوسط پتانسیل الکتروستاتیکی مثبت متوسط و سطح (100) پتانسیل الکتروستاتیکی منفی مثبت می‌شود. در نتیجه یون‌های فلزی مثبت در اثر جاذبه الکتروستاتیکی جذب سطح (101) شده و این سطح را می‌پوشانند و مانع از رشد آن می‌شوند [۱۰].

EDTA (Thylenediamine tetra actic acid) به عنوان یک ماده‌ی آلی با فرمول شیمیایی زیر در آب به خوبی قابل حل می‌باشد [۴].

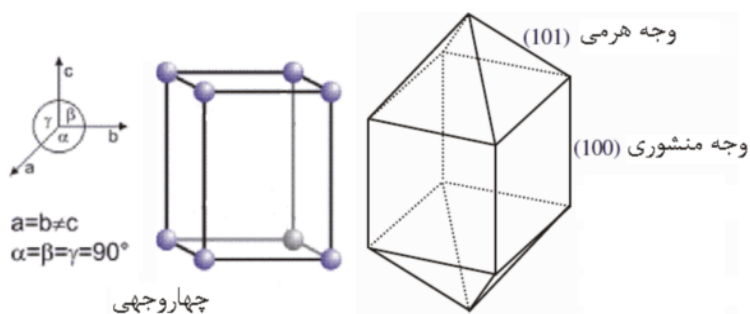


EDTA در محلول رشد با تشکیل ترکیب‌های قوی با فلزات سنگین مانند Al و Fe و Cr فعالیت‌های شیمیایی این یون‌ها را خنثی می‌کند [۴]. عرض ناحیه‌ی نیمه پایداری در محلول KDP که به آن EDTA اضافه شده باشد، نسبت به محلول خالص افزایش یافته و در نتیجه سرعت رشد نیز افزایش می‌یابد [۱۱].

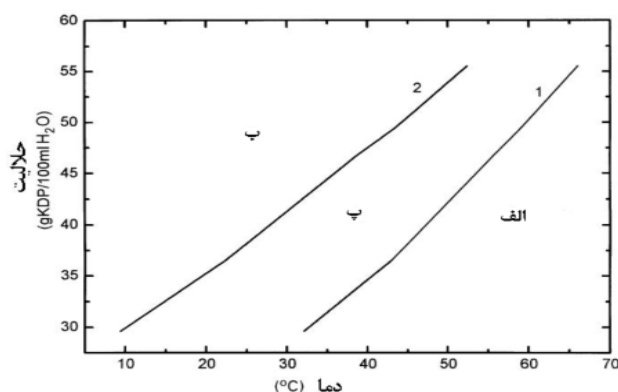
بلور یک فاکتور حیاتی است. سرعت رشد بالا، به شدت وابسته به پایداری محلول است که خود آن نیز وابسته به عرض منطقه‌ی نیمه پایداری محلول در ناحیه‌ی فوق اشباع‌شدگی است. هر چه عرض منطقه‌ی نیمه پایداری بیشتر باشد محلول از پایداری بالاتری برخوردار است [۷] (شکل ۲).

به خوبی شناخته شده است که یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مؤثر در رشد بلور KDP و شکل و کیفیت آن ناخالصی‌ها هستند. کنترل ناخالصی در فرایند رشد بلور از محلول بر فاکتورهای متعددی تأثیرگذار است، از جمله پایداری محلول رشد، برهمکنش بین محلول میزبان و ناخالصی، اندازه‌ی نسبی ناخالصی و یون‌های میزبان در ساختار بلور و شباهت ساختار بلور حاوی ناخالصی با ساختار خالص [۱۸]. ناخالصی می‌تواند رشد بلور را کاهش یا افزایش یا کاملاً متوقف سازد. ناخالصی معمولاً روی وجوه مشخصی از ساختار بلور عمل می‌کند. تأثیر ناخالصی بستگی به غلظت ناخالصی، فوق اشباع‌شدگی، دما و PH محلول دارد [۲].

برای رشد بلورها با درجه‌ی خلوص بالا و ابعاد بزرگ می‌توان از مقادیر کم بعضی از افزودنی‌ها به خصوص افزودنی‌های آلی به عنوان عامل پایداری‌کننده‌ی محلول استفاده کرد [۵،۶]. بنابراین استفاده از افزودنی‌های مخصوص راه مؤثری برای بالا بردن عرض منطقه‌ی نیمه پایداری محلول و در نتیجه تندتر شدن سرعت رشد است [۹]. فلزهای سنگین مانند Al و Fe و Cr که در مواد شیمیایی تجاری همواره به عنوان ناخالصی وجود دارند، با ایجاد هستک سازی‌های ثانویه عرض ناحیه‌ی نیمه پایداری را کاهش می‌دهند [۴]. همچنین یون‌های فلزی در محلول روی وجه منشوری بلور جمع شده و پیوندهای قوی آن‌ها با PO_4 به سختی با کاتیون‌های ضعیف‌تری مانند K^+ و



شکل ۱ ساختار و وجوه رشد بلور KDP.



شکل ۲ نمودار حلالیت محلول KDP در آب، ۱: نمودار حلالیت، ۲: نمودار دوم حلالیت، الف: ناحیه پایدار، ب: ناحیه ناپایداری، پ: ناحیه نیمه پایدار [۴].

روش آزمایش

در این پژوهش برای رشد بلور از روش بلوردانه گذار در محلول با غلظت معین و رشد خود بخودی در دمای اتاق استفاده شد. رشد از محلول را در ظرف‌های مختلف با اندازه و شکل‌های متفاوت امتحان کردیم. در نهایت بلورهای با کیفیت بهتر در ظروف استوانه‌ای با حجم ۱۰۰ میلی لیتر و قطر سطح مقطع ۳/۵ و ارتفاع ۱۳ سانتیمتر به دست آمدند. شکل خاص این ظروف این امکان را می‌دهد که سطح مقطع با تبخیر بهینه‌ای داشته باشیم. در بشرهای معمولی با توجه به اینکه سطح مقطع تبخیر بیشتری دارند رسوب بلوردانه‌های کوچک در ته ظرف که یک عامل بازدارنده است، اجتناب ناپذیر است.

محلول KDP در غلظت‌های متفاوت برای آزمایش تهیه شد و در نهایت غلظت محلول رشد (gr KDP/۱۰۰ ml H₂O) ۲۵ انتخاب شد. به این دلیل که بیشترین غلظت در چگونگی آزمایش ما بود که هستک‌سازی‌های ناخواسته به حداقل می‌رسید. البته برای آزمایش‌های مختلف بنابر نیاز، این غلظت می‌تواند تغییر کند. برای رسیدن به محلول یکنواخت، هر بار محلول را به مدت ۲۴ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار دادیم و برای به حداقل رساندن ناخالصی‌های ناخواسته، محلول با استفاده از فیلتر خلأ تصفیه شد. بلوردانه‌های مورد نیاز به روش رشد خود بخودی از محلول فوق اشباع تهیه شد و برای مقایسه‌ی دقیق‌تر بلوردانه‌ها باید در اندازه و شکل‌های تقریباً یکسان انتخاب شوند و روی صفحه‌ی رشد درون محلول قرار گیرند.

در این پژوهش با توجه به اینکه برای ما مقایسه‌ی اثر مقادیر مختلف ناخالصی روی بلور اهمیت دارد نه اندازه‌ی بلور،

این روش این امکان را فراهم می‌کند که تعداد زیادی بلور با مقادیر و انواع مختلف ناخالصی را در شرایط کاملاً یکسان همزمان با هم رشد دهیم و مقایسه‌ی دقیقی را از نتایج داشته باشیم. نتایج برای رشد سریع و در ابعاد صنعتی قابل تعمیم است.

بحث و بررسی

ناخالصی یون‌های فلزی و رشد ظاهری

شکل (۳) مقایسه‌ای از تأثیر یون‌های Cu^{2+} و Fe^{3+} و Al^{3+} روی رشد ظاهری بلور KDP را نشان می‌دهد. این بلورها در شرایط شرح داده شده و با درصد‌های وزنی یکسان ۰/۰۰۱٪ از نمک‌های $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ و $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ و $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ از محلول با غلظت (۲۵ gr KDP/۱۰۰ ml H₂O) به مدت ۹ روز رشد داده شدند.

حضور یون‌های فلزی مثبت در محلول KDP باعث افزایش رشد سطوح هرمی و مانع از رشد سطوح منشوری شده و بلور به صورت طولی رشد کرده و سوزنی شکل می‌شود. شکل سوزنی بلورها، بررسی‌های تئوری تأثیرهای یون‌های فلزی مثبت را روی هر یک از سطوحی که در مرجع [۱۲] به آن پرداخته شده، به خوبی تأیید می‌کند. تأثیر بیشتر یون‌های Fe^{3+} و Al^{3+} نسبت به Cu^{2+} در شکل (۳) کاملاً مشهود است.

در شکل (۴) و جدول ۱ شاهد مقایسه‌ی دقیق‌تری از تأثیر یون فلزی روی شکل ظاهری و سرعت رشد بلور هستیم. شکل (۴) الف بلور رشد داده شده از محلول خالص KDP و شکل (۴) ب از محلول KDP با ۰/۰۰۱ wt% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ در شرایط شرح داده شده و از محلول با غلظت (۲۵ gr KDP/۱۰۰ ml H₂O) به مدت ۱۰ روز رشد داده شده‌اند.



شکل ۳ بلورهای رشد داده شده از محلول KDP با الف: $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ۰/۰۰۱ wt% ، ب: $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ۰/۰۰۱ wt% ، پ: $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ۰/۰۰۱ wt%.



شکل ۴ الف: بلور رشد داده شده از محلول خالص KDP و ب: از محلول $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ۰/۰۰۱ wt%.

جدول ۱ وابستگی سرعت رشد در راستاهای مختلف [100] و [001] بلور KDP با آلیاژ Al^{3+} در محلول.

محل	سرعت رشد در راستای [100] (mm/day)	سرعت رشد در راستای [001] (mm/day)
خالص	۰/۳	۰/۸۷
$\text{KDP} + ۰/۰۰۱ \text{ wt}\% \text{ Al}(\text{NO}_3)_3$	۰/۰	۲/۸

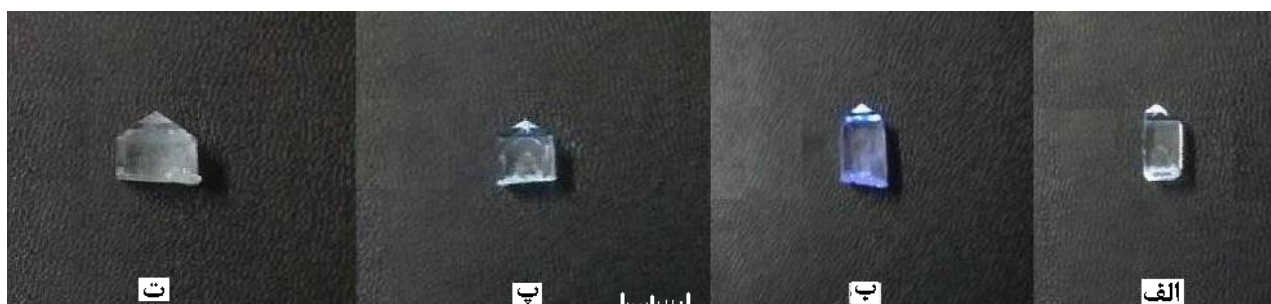
می‌دهد.

بلور رشد داده شده در محلول خالص (شکل ۵ الف) رشد بسیار کمی در راستای [100] و [010] یعنی وجوه منشوری از خود نشان می‌دهد (که این پدیده باعث عدم دستیابی به بلورهایی در ابعاد مورد نیاز لیزر همجوشی می‌شود). چنانکه در مقدمه آورده شد، این پدیده می‌تواند به خاطر تأثیر بازدارنده‌ی ناخالصی‌های یون‌های فلزی موجود در محلول روی رشد وجوه منشوری باشد. با افزایش غلظت EDTA در شکل (۵) ب و پ شاهد افزایش رشد وجوه منشوری هستیم. هرچه غلظت EDTA بیشتر می‌شود شاهد نزدیکی سرعت رشد در تمامی وجوه هرمی و منشوری هستیم تا جایی که در شکل (۵) ت بلور رشد تقریباً یکسانی در تمام ابعاد داشته است، که این نیز می‌تواند به دلیل بازدارندگی EDTA بر تأثیر یون‌های فلزی روی وجوه منشوری باشد.

بنابراین با افزودن ناخالصی یون Al^{3+} به محلول رشد، شاهد متوقف شدن رشد در بخش هرمی و افزایش سرعت رشد در بخش منشوری هستیم. یون‌های فلزی مثبت، جذب وجوه مختلف منشوری شده‌اند و از رشد این سطوح به شدت جلوگیری کرده‌اند. افزایش سرعت رشد بلور در راستای [001] نیز می‌تواند به دلیل کاهش انرژی آزاد سطح باشد که خود نیز با افزایش غلظت ناخالصی کاهش می‌یابد [۱۳].

بررسی اثر مقدار افزودنی EDTA بر روی رشد

شکل (۵) مقایسه‌ای از تأثیر مقدار EDTA به عنوان ناخالصی افزوده شده به محلول رشد را ارائه می‌دهد. این بلورها در شرایط شرح داده شده به صورت خالص و با درصدهای وزنی ۰/۱٪ و ۰/۰۱٪ و ۰/۰۰۱٪ افزودنی EDTA و از محلول با غلظت (۲۵ gr KDP/۱۰۰ ml H_2O) در مدت ۱۰ روز رشد داده شده‌اند. جدول ۲ ابعاد بلورهای رشد داده شده را نشان



شکل ۵ بلورهای رشد داده شده از محلول با غلظت (۲۵ gr KDP/۱۰۰ ml H₂O) در مدت ۱۰ روز، الف: KDP خالص، ب: EDTA + ۰/۰۰۱ wt% KDP، پ: EDTA + ۰/۰۱ wt% KDP، ت: EDTA + ۰/۱ wt% KDP.

جدول ۲ ابعاد بلورهای رشد داده شده از محلول با غلظت (۲۵ gr KDP/۱۰۰ ml H₂O) به صورت خالص و با درصدهای وزنی ۰/۱٪ و ۰/۰۱٪ افزودنی EDTA اضافه شده به آن در مدت ۱۰ روز.

نمونه	[100] (mm)	[010] (mm)	[001] (mm)
KDP خالص	۶	۶۳	۱۲
KDP + ۰/۰۰۱ wt% EDTA	۷/۲	۷/۲	۱۲
KDP + ۰/۰۱ wt% EDTA	۷/۵	۷/۵	۱۰/۸
KDP + ۰/۱ wt% EDTA	۱۱/۲	۱۱/۶	۱۱/۸

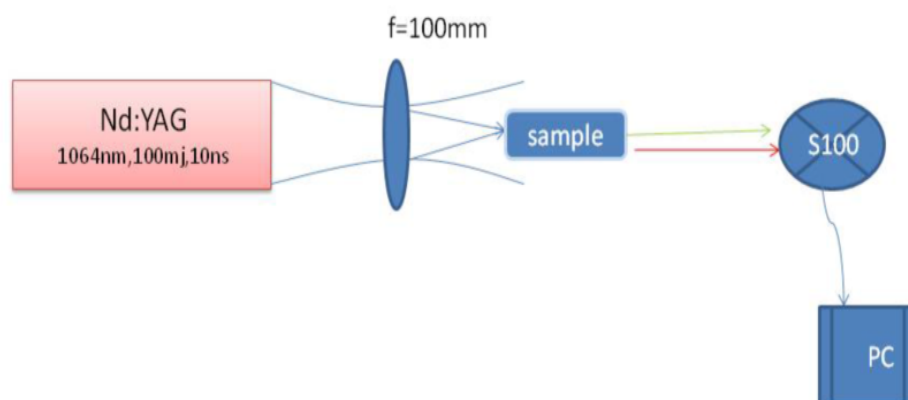
تولید هماهنگ دوم

در این بررسی می‌توان تابش هماهنگ دوم را در زمانی که یک باریکه‌ی لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴nm روی بلور رشد یافته متمرکز می‌شود، مشاهده کرد. برای مشاهده‌ی این پدیده، باریکه‌ی خروجی لیزر روی بلور متمرکز می‌شود. لیزر استفاده شده می‌بایست Q-switch شده باشد. از یک عدسی برای همگرا کردن پرتوی لیزر استفاده شده است. برای ثبت نتایج، پس از محل قرار گرفتن نمونه، از یک آشکارساز S-۱۰۰ استفاده می‌شود. این دستگاه به وسیله‌ی یک رایانه‌ی با نرم‌افزار مخصوص S-۱۰۰ در ارتباط است. برای یافتن سمتگیری مناسب بلور حول محور اپتیکی آن برای مشاهده‌ی هماهنگ دوم، از روش آزمون و خطا استفاده کردیم. طرح کلی این سنجش در شکل زیر نمایش داده شده است (شکل ۶).

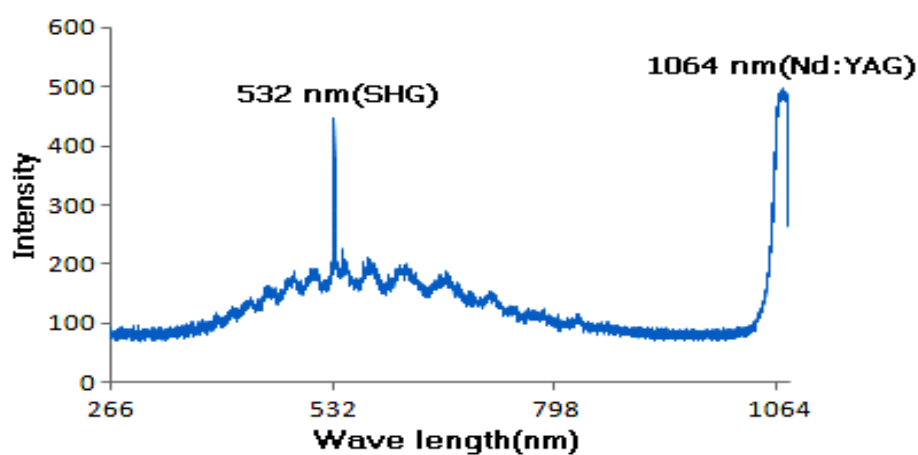
شکل (۷) نشان دهنده‌ی هماهنگ دوم حاصل از نمونه‌ی KDP + ۰/۰۰۱ wt% EDTA از بلورهای رشد یافته به این روش است.

بررسی بیناب مرئی - فرابنفش

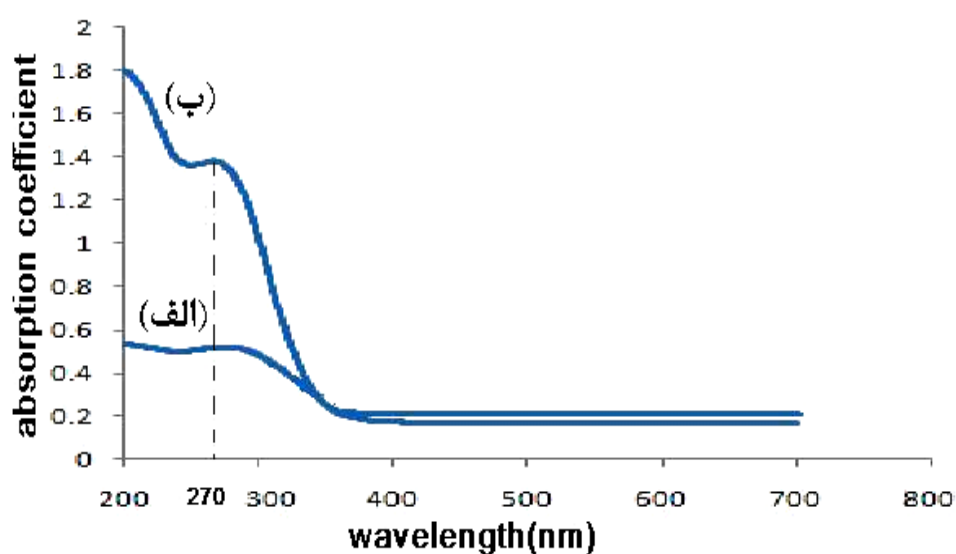
برای کاربرد در لیزرهای همجوشی هماهنگ‌های سوم و چهارم نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند. برای مثال پایه‌ی ۱۰۶۴ nm لیزر Nd:YAG با استفاده از KDP در هماهنگ سوم به ۳۵۵ nm و در هماهنگ چهارم به ۲۶۶ nm تبدیل می‌شود. نقص شبکه و نوارهای جذب ناخواسته در بلور همپوشنی می‌کنند و در مجموع پهنای باند جذب نامطلوبی را برای دمش اپتیکی به وجود می‌آورند [۱۴]. بنابراین کیفیت و جذب اپتیکی ناحیه‌ی فرابنفش و نزدیک آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طیف مرئی - فرابنفش از حالت جامد نمونه‌ها با یک نورسنج ساخت شرکت Perkin-Elmer مدل 45 lambada در ناحیه‌ی بینابی ۸۰۰-۲۰۰ nm تهیه شدند. در شکل (۸) بیناب جذب ناحیه‌ی دیدگان - فرابنفش برای وجه (100) از بلور خالص KDP و KDP رشد داده شده با درصد وزنی ۰/۰۰۱٪ از نمک Al(NO₃)₃ در محلول KDP با غلظت (۲۵ gr KDP/۱۰۰ ml H₂O) مشاهده می‌شود.



شکل ۶ طرح کلی نمایش تولید هارمونیک دوم.



شکل ۷ هماهنگ دوم تولید شده با استفاده از بلور $\text{KDP} + 0.01\text{ wt\% EDTA}$.



شکل ۸ بیناب جذب ناحیه دیدگان-فرابنفش برای وجه (100) از الف: بلور خالص KDP و ب: $\text{KDP} + 0.01\text{ wt\% EDTA}$ بلور با ناخالصی Al^{3+} دارای جذب اضافی در ناحیه ۲۰۰-۳۵۰ nm با قله‌ای در ۲۷۰ nm است.

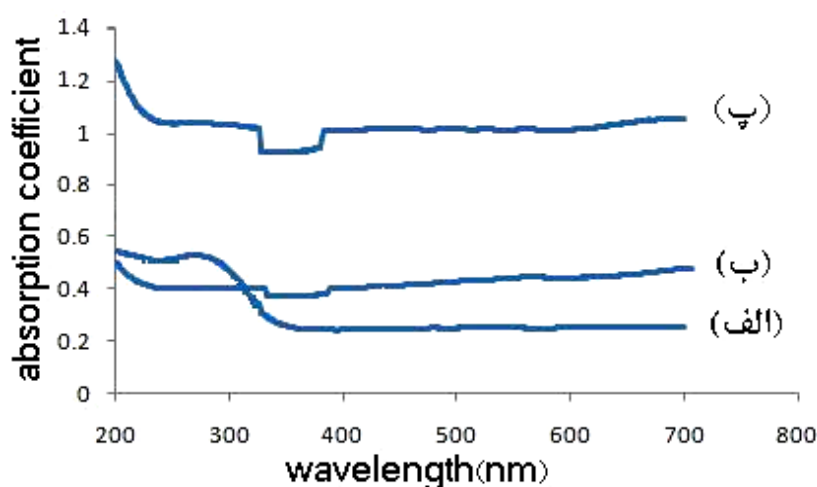
سوی EDTA می‌دانیم. بلور رشد داده شده با درصد وزنی ۰/۱٪ از افزودنی EDTA جذب کمتری در ناحیه ۲۰۰-۳۰۰ nm ولی با افزایش بیشتر EDTA شاهد جذب بیشتری در کل طیف خواهیم بود. بنابراین تنظیم دقیق مقدار EDTA در محلول با غلظت معین، فاکتور مهمی در فرایند رشد و کنترل کیفیت بلور است.

برداشت

حضور یون‌های فلزی مثبت در محلول KDP باعث افزایش رشد سطوح هرمی و مانع از رشد سطوح منشوری می‌شود و بلور به صورت طولی رشد کرده و سوزنی شکل می‌شود. با افزودن EDTA به محلول رشد، شاهد افزایش رشد سطوح منشوری هستیم. هرچه غلظت EDTA بیشتر می‌شود شاهد نزدیکی سرعت رشد در تمامی وجوه هرمی و منشوری هستیم تا جایی که در محلول EDTA ۰/۱ wt% KDP+ بلور رشد تقریباً یکسانی را در تمام ابعاد داشته است، که این می‌تواند به دلیل بازدارندگی EDTA بر تأثیر یون‌های فلزی روی وجوه منشوری باشد. بلور رشد داده شده با درصد وزنی ۰/۱٪ از افزودنی EDTA جذب کمتری در ناحیه فرابنفش ۲۰۰-۳۰۰ nm نسبت به مورد KDP خالص از خود نشان می‌دهد که این نیز می‌تواند به دلیل بازدارندگی EDTA بر تأثیر یون‌های فلزی در جذب ناحیه فرابنفش باشد.

بلور دارای ناخالصی Al^{3+} در ناحیه ۲۰۰-۳۵۰ nm جذب اضافی نشان می‌دهد. بیشترین جذب اپتیکی ناخواسته دارای قله‌ای در ۲۷۰ nm است. اولین نامزد جذب در این ناحیه جانشینی، یون‌های Al^{3+} به جای K^+ در شبکه بلور است. در مرجع [۱۴] که به بررسی جذب اپتیکی و تشدید پارامغناطیسی الکترون (EPR) یون‌های Fe در بلور KDP می‌پردازد، این قله‌ی جذب در ناحیه فرابنفش نیز دقیقاً در ۲۷۰ nm رخ داده است و به این نتیجه رسیده است که سهم یون‌های Al^{3+} در مکان‌های اشغال شده بیش از مکان K^+ است و پیشنهاد می‌کند بیشترین جذب اپتیکی در ناحیه ۲۰۰-۳۰۰ nm به دلیل جانشینی یون‌های Fe به جای فسفر به-عنوان واحدهای مولکولی $(FeO_4)^{2-}$ در بلور KDP است. بنابراین به دلیل مشابه به نظر می‌رسد که بخش قابل توجهی از یون‌های Al^{3+} در بلور KDP می‌تواند در واحدهای $(PO_4)^{2-}$ جایگزین شده و به صورت $(AlO_4)^{2-}$ ارائه شود. در طیف بلور خالص نیز این قله در ۲۷۰ nm ولی با شدت کمتر ظاهر می‌شود که به نظر می‌رسد این جذب نیز به دلیل وجود ناخالصی یون‌های فلزی در مواد اولیه باشد.

در شکل (۹) طیف جذب ناحیه مرئی-فرابنفش وجه (۱۰۰) از بلور خالص KDP و KDP+ ۰/۱ wt% EDTA و ۰/۱ wt% EDTA در محلول با غلظت $(25 \text{ gr KDP} / 100 \text{ l H}_2\text{O})$ مشاهده می‌شود. در این طیف‌ها از قله‌ی جذب ۲۷۰ nm خبری نیست که ما آن را دلیلی دیگر بر خنثی سازی تأثیر یون‌های فلزی از



شکل ۹ طیف جذب ناحیه مرئی-فرابنفش برای وجه (۱۰۰)، الف: KDP خالص، ب: KDP+ ۰/۱ wt% EDTA، پ: EDTA ۰/۱ wt% KDP+

مراجع

- [8] Sangwal K., J. "Cryst. Growth" 203 (1999) 197.
- [9] Zaitseva N.P., De Yoreo J.J., Dehaven M.R., Vital R.L., Montgomery K.E., Richardson M., Atherton L.J., J. "Crystal Growth" 180 (1997) 255.
- [10] Asakuma Y., Jee L., Nishimura M., Ming Ang H., Tade M., Maeda K., Fukui K., J. "Molecular Structure", THEOCHEM 851 (2008) 225–231.
- [11] Nakatsuka M., Fujioka K., Kanabe T., Fujita H., J. "Crystal Growth" 171 (1997) 531.
- [12] Owczarek I., Sangwal K., J. "Cryst. Growth" 102 (1990) 574.
- [13] Sangwal K., Mielniczek-Brzoska E., "Cryst. Res". Technol 36 (2001) 837.
- [14] Garces, Stevens K.T., Halliburton L.E., Yan. M., J. "Crystal Growth" 225 (2001) 435–439
- [1] E. Kirkova, B. Djarova, B. Donkova, Prog. "Cryst. Growth", Charact. 32(1996) 117
- [2] Seif S., Bhat K., Batra A., Aggarwal M., Lal R., "Materials Letters" 58 (2004) 991–994
- [3] Painsner J.A., Boyes J.D., Kuopen S.A., "Laser Focus", World 30 (5) (1994) 75
- [4] Shangfeng Y., Genbo S., Zhengdong L., Rihong J., J. "Crystal Growth" 197 (1999) 383–387.
- [5] Shengali W., Zhangshou G., Youjun F., Xun S., Jiegao Z., Hong Z., Yiping L., J. "Cryst. Growth" 223 (2001) 415
- [6] Jianzhong C., Sukun L., Fengtu Y., Jiahe W., Jianming L., J. "Cryst. Growth" 179(1997) 226
- [7] Buckley H.E. (Ed.), "Crystal Growth", Wiley, New York, 1951.