

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1401.8.2.5.5](https://doi.org/10.1001.1.24767131.1401.8.2.5.5)

درصد همانندی: ۸٪

طراحی و ساخت یک لیزر سبز-آبی براساس تولید هماهنگ‌های لیزر Nd:YAG برای استفاده در سامانه لیدار دریایی

حسن عبادیان^۱، علیرضا پژ^{۲*}، مجید بابایی توسکی^۳، عباس ملکی^۴

h.ebadian@mut-es.ac.ir

^۱مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

alireza_pezh@mut-es.ac.ir

^{۲*}نویسنده مسئول، مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

babaiym68@mut-es.ac.ir

^۳مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

abmaleki@mut-es.ac.ir

^۴مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

چکیده

در این مقاله، چیدمان آزمایشگاهی یک لیزر سبز-آبی مناسب برای کاربردهای لیدار دریایی بررسی می‌شود که بر اساس هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم لیزر Nd:YAG طراحی و ساخته شده است. امروزه به عمق‌سنجی و تشخیص اجسام زیر سطح آب با کمک سامانه‌های لیداری در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و نظامی نیاز است. برای تولید تابش لیزر سبز-آبی، در اینجا از ترکیب یک لیزر Nd:YAG پالسی با ساختار نوسانگر-تقویت‌کننده همراه با بلورهای غیرخطی KTP، DKDP و KDP به ترتیب برای تولید طول‌موج‌های ۵۳۲، ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتر استفاده شده است. با انرژی دمش ۱/۱ ژول، حداکثر انرژی ۷۰۰، ۲۲۰ و ۶۵ میلی‌ژول در هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم لیزر Nd:YAG به دست آمد. بازده تبدیل نوری به نوری در طول‌موج‌های ۵۳۲، ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتر به ترتیب ۶۴، ۲۰ و ۹ درصد است.

واژه‌های کلیدی: لیدار دریایی، تولید هماهنگ، جورشدگی فازی، لیزر Nd:YAG

۱. مقدمه

کاربردهای صنعتی و تجاری گوناگونی برای هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم لیزر Nd:YAG با طول‌موج‌های سبز-آبی یعنی ۵۳۲، ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتر وجود دارد که می‌توان به فوتولیتوگرافی مواد نیمه‌رسانا، میکروماشین، پردازش مواد، طیف‌سنجی، کاربردهای فضایی، عمق‌سنجی زیر سطح آب و غیره اشاره نمود [۷-۱].

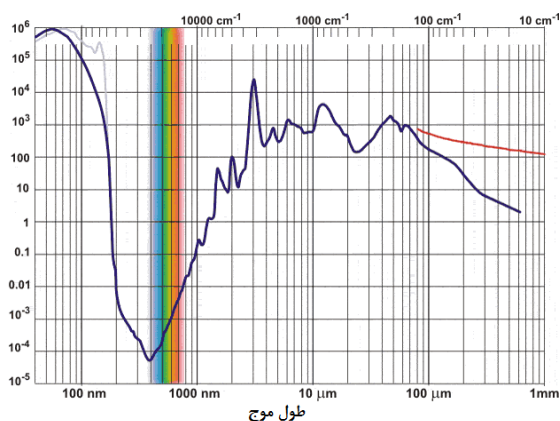
کشف و شناسایی اجسام و اهداف در زیر سطح آب دریا یکی از چالش‌های جدی در حوزه دریانوردی است. از این رو، تهیه نقشه از ناهمواری‌های کف دریا و به‌خصوص در نواحی ساحلی که عمق کاهش می‌یابد از مسائل مهم در کشتیرانی محسوب می‌شود. از طرفی کشف و شناسایی اجسامی مانند مین‌های دریایی و زیردریایی‌ها نیز در حوزه نظامی حیاتی است. بدین منظور، در سال‌های اخیر استفاده از سامانه‌های لیداری^۱ مورد توجه قرار گرفته است. در این سامانه‌ها از پالس‌های نوری همدوس لیزری استفاده می‌شود که معمولاً روی وسایل هوایی مانند بالگرد یا هواپیماهای کوچک نصب می‌شوند تا با سرعت زیادی ناحیه مورد نظر را پایش نمایند. در زمینه کاربرد لیزر سبز-آبی در لیدار دریایی، شرکت‌های متعددی محصولات گوناگونی را توسعه داده‌اند که می‌توان به SHOALS، HAWK-EYE، LADS و ... اشاره نمود [۸-۱۰].

در سال ۲۰۰۰ از SHOALS-400 برای تعیین مرزهای کشورهای غیر ناتو استفاده شده است. تمرکز ناتو بر عملکرد پاسخ سریع این سامانه در شناسایی تغییرات در طبیعت اقیانوس و مناطق ساحلی بود تا بتواند عملکرد مناسبی را برای پشتیبانی ۸۰ کشتی جنگی، ۲ گردان دریایی، ۱۱ تیم ویژه ضربت و ۱۲۵ هواپیما داشته باشد. نتایج نشان داد که لیدار هوایی در تشخیص سریع نواحی عملیاتی ناشناخته ساحلی بسیار کارایی دارد. از این سامانه برای شناسایی آب‌های با تغییرات زیاد و ناشناخته و مناطق حساس مانند عراق، تی‌مور و بوسنی نیز استفاده شد. این سامانه لیداری از یک روبشگر پالسی و یک فرستنده لیزری با طول‌موج‌های مادون‌قرمز نزدیک و سبز-آبی با چهار کانال دریافت‌کننده که در بالگرد

یا هواپیما نصب می‌شوند، تشکیل شده است. از لیزر مادون‌قرمز نزدیک برای بهینه‌سازی تشخیص سطح آب، به علت نفوذ نکردن این طول‌موج در آب، استفاده می‌شود [۱۱].

در سامانه‌های لیدار دریایی، به دلیل نیاز به ارسال نور از درون محیط آبی، باید از طول‌موجی استفاده نمود که جذب کمی را در آب داشته باشد. هماهنگ‌های لیزر Nd:YAG که طول‌موج آن‌ها ۵۳۲ نانومتر (سبز) و ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتر (آبی) است، از جمله گزینه‌های اصلی برای این کاربرد است. در شکل ۱ منحنی جذب آب برای طول‌موج‌های مختلف ارائه شده است. در آب‌های طبیعی، مواد آلی و ذرات معلق همچون رنگ‌دانه‌های فیتوپلانکتون‌ها و ... وجود دارند. از این رو با توجه به میزان غلظت این ذرات و مواد، ضریب جذب طیفی آب دریا می‌تواند متفاوت باشد [۱۲-۱۴]. با این حال، طول‌موج‌های سبز-آبی همچنان برای کاربردهای دریایی مناسب است.

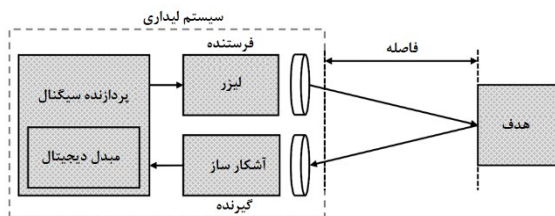
تولید هماهنگ‌ها با استفاده از منابع لیزری، معمولاً با فرایندهای غیرخطی و با استفاده از مواد نوری غیرخطی صورت می‌پذیرد [۱۵-۱۶] که در اینجا از بلورهای غیرخطی KDP، KTP و DKDP استفاده شده است. این بلورها ویژگی‌های عالی از قبیل ضریب غیرخطی متوسط، آستانه تخریب بالا، موجود در اندازه‌های بزرگ با کیفیت اپتیکی بالا و ارزان‌قیمت دارند که برای تولید هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم لیزر Nd:YAG پالسی مناسب هستند [۱۷-۱۸].



شکل ۱. نمودار ضریب جذب آب (cm^{-1}) در طول‌موج‌های مختلف

[۱۹].

لیداری که برای کارهای عمق‌سنجی استفاده می‌شود بر پایه پدیده‌های پراکندگی، بازتاب و جذب پرتو نوری با حجم آب بنا نهاده شده است؛ به شکل ۲ رجوع کنید. بنابراین به‌طور کلی یک سامانه لیداری از سه بخش اصلی فرستنده، گیرنده و آشکارساز تشکیل شده است. طرح‌واره‌ای از سامانه کلی لیدار در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. طرح‌واره کلی از اجزای سامانه لیدار

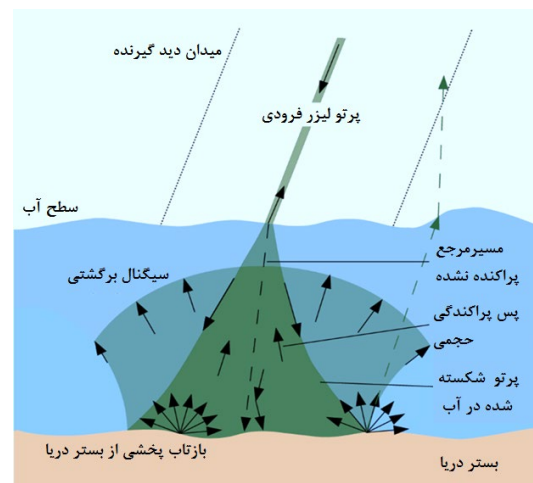
وظیفه بخش فرستنده تولید نور و هدایت آن به سمت محیط است. لیزرها را می‌توان به‌عنوان منابعی تقریباً ایده‌آل برای انجام این کار انتخاب نمود. خواصی چون واگرایی کم، پهنای فرکانسی باریک و پالس‌هایی با پهنای زمانی کم و توان بالا از مزایای پرتوهای لیزری است. کوچک بودن واگرایی پرتوهای لیزری این مزیت را دارد که با استفاده از آن می‌توان منطقه کوچک و دلخواهی از محیط را بررسی کرد و به این وسیله میزان تفکیک سطحی را بالا برد. علاوه بر این، میزان تابش پس‌زمینه نیز کاهش خواهد یافت. پس‌زمینه که به‌عنوان نوفه عمل می‌کند، می‌تواند از نور خورشید، سطح آب و... ناشی شود. از طرفی هر چقدر میزان میدان دید (FOV^2) بخش گیرنده بیشتر باشد، میزان نور پس‌زمینه نیز بیشتر خواهد بود. این مورد هنگامی که لیدار در روز فعال است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند چراکه نور خورشید خود به‌عنوان اصلی‌ترین پس‌زمینه در روز مطرح است. بهترین حالت هنگامی است که تمام پرتوهای لیزری در میدان دید بخش گیرنده قرار گیرند. در این حالت بازده سامانه حداکثر است. پس بهتر است که زاویه واگرایی لیزر کوچک باشد تا تمام آن در میدان دید بخش گیرنده واقع شود.

بخش گیرنده لیدار، تابش‌های پراکنده شده از هدف را جمع‌آوری می‌کند و آن‌ها را به‌سوی بخش آشکارساز لیدار

در این مقاله، یک لیزر سبز-آبی مناسب برای کاربرد لیدار دریایی بررسی می‌شود که بر اساس هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم لیزر Nd:YAG است. در ابتدا به‌طور خلاصه مقدمه‌ای از اصول و نحوه عملکرد لیدارهای عمق‌سنجی بیان و چیدمان آزمایشگاهی لیزر طراحی و ساخته شده بررسی می‌شود. در نهایت نیز با توجه به نتایج به‌دست آمده، پارامترهای خروجی لیزر ارزیابی خواهد شد.

۲. لیدار عمق‌سنجی

لیدار که مخفف عبارت آشکارسازی نوری و بردیابی است، یک ابزار دورحسی نوری از نوع فعال است. در این رهیافت با استفاده از یک منبع لیزر پالسی، پالس‌های نوری به داخل محیط موردنظر ارسال و نور پس‌پراکنده شده با یک تأخیر زمانی وابسته به فاصله توسط بخش گیرنده لیدار، آشکار می‌شود. بر این اساس تکنیک لیدار شباهت بسیار زیادی به تکنیک رادار دارد تا جایی که گاهی اوقات به آن رادار لیزری نیز گفته می‌شود. تفاوت این دو را می‌توان در طول‌موج‌های مورد استفاده آن‌ها جستجو کرد؛ رادار از امواج رادیویی با طول‌موج‌هایی در حد سانتی‌متر استفاده می‌نماید در حالی که لیدار از طول‌موج‌های نوری خارج‌شده از لیزرها بهره می‌برد. طول‌موج‌های نوری استفاده‌شده توسط لیدار بسته به نوع کاربردها، محدوده‌ای از ماوراءبنفش تا مادون‌قرمز را می‌پوشاند.



شکل ۲. فرایندهای فیزیکی محتمل برای پالس لیزر فرودی بر روی آب.

نوری را به سمت آب ارسال می‌کند؛ پالس تابشی ابتدا به‌وسیله موازی‌کننده بخش فرستنده به یک پرتو نوری موازی تغییر شکل داده و به درون آب فرستاده می‌شود. از طرفی قسمتی از انرژی پالس فرستاده‌شده، برای ثبت زمان خروج و کنترل توان تابشی به بخش گیرنده هدایت می‌شود. قسمت اصلی پالس نوری منتشرشده به‌وسیله حجم در نظر گرفته‌شده از محیط آزمایش، که ممکن است شامل اجسام موردنظر باشد، منعکس شده و پراکنده می‌شود. در کاربردهای عملی، قسمتی از انرژی پالس لیزر در نتیجه شکست، پراکندگی و جذب در سطح آب و همچنین حرکت در ستون آب، گم می‌شود و سهم باقی‌مانده از پالس لیزری به دریچهٔ تلسکوپ گیرنده برخورد می‌کند. سیگنال برگشتی لیدار به‌وسیله گیرنده‌های اپتیکی به داخل تحلیل‌گر فرستاده شده و به بخش آشکارساز می‌رسد. آشکارساز سیگنال برگشتی لیدار را به سیگنال الکتریکی تبدیل و سپس آن را تقویت می‌کند. سیگنال‌های رسیده به‌وسیلهٔ مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، برای پردازش به شکل دیجیتالی درآمده و این سیگنال‌ها پس از ورود به رایانه پردازش و ذخیره می‌شوند.

انرژی پالس دریافتی در نهایت به کمک معادله لیدار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$E(\lambda, R) = E_L \xi(\lambda) T(R) \zeta(R) \times \frac{A_0}{R^2} \beta(\lambda_L, \lambda, R) \frac{c \tau_d}{2} \quad (1)$$

که E_L انرژی ارسالی لیزر در طول موج λ_L ، τ_d زمان پاسخ آشکارساز به تابش فرودی، β ضریب پراکندگی حجمی، T ضریب عبور جو در طول موج λ ، ζ ضریب عبور طیفی سامانه دریافت‌کننده و ξ احتمال رسیدن تابش واقع در فاصله R نسبت به آشکارساز است. با تحلیل اجزای این رابطه و بستگی صریح پارامترهای موجود به طول‌موج‌های سبز-آبی لیزر، می‌توان طراحی دقیقی از سامانه لیداری را انجام داد.

۳. چیدمان آزمایشگاهی لیزر سامانه لیدار دریایی

برای دمش بلورهای غیرخطی و تولید لیزرهای سبز-آبی، در اینجا از یک لیزر Nd:YAG پالسی طراحی و ساخته‌شده با ساختار نوسانگر-تقویت‌کننده MOPA^۸ استفاده شده است.

هدایت می‌کند. این قسمت معمولاً از دو زیربخش اپتیکی و تحلیل‌گر تشکیل شده است. ساده‌ترین ابزار اپتیکی مورد استفاده می‌تواند یک آینه باشد که نور پراکنده‌شده از محیط را در یک نقطه کانونی نماید. اندازه گیرنده اپتیکی، عاملی مهم در دستگاه‌های لیداری است. یک سیستم اپتیکی با دهانه بزرگ، قادر به جمع‌آوری میزان زیادی از تابش‌های پراکنده شده است. قطر دهانه سامانه اپتیکی می‌تواند از چند سانتی‌متر تا حدود متر متغیر باشد. معمولاً سامانه‌های اپتیکی با دهانه کوچک را برای دورحسی در فواصل نزدیک به کار می‌برند. بعدازاینکه پرتوهای نوری توسط قسمت اپتیکی جمع‌آوری شد، قبل از رسیدن به بخش آشکارساز مورد تحلیل اپتیکی قرار می‌گیرند. این تحلیل‌ها با توجه به هدف ما می‌تواند بر اساس قطبش، طول‌موج یا فاصله باشد [۲۰].

بخش آشکارساز نوری نسبت به نور فرودی حساس بوده و نور پراکنده‌شده از جسم را که به گیرنده می‌رسد، آشکار و به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. این وسایل با توجه به نوع کاربرد به دو دسته کلی آشکارکننده‌های سیگنال و تصویر تقسیم‌بندی می‌شوند. آشکارکننده‌های سیگنال نور را از بخش گیرنده دریافت و شدت را به‌صورت تابعی از فاصله ترسیم می‌کند. در این نوع از آشکارسازها، با وجود تفکیک عمقی، امکان تفکیک سطحی وجود ندارد. از این قبیل وسایل می‌توان چند برابرکننده‌های نوری (PMT^۳)، PIN دیودها، فوتودیودهای آبخاری (APD^۴) و آشکارساز MCT مادون‌قرمز را نام برد. این در حالی است که در آشکارکننده‌های تصویری، سیگنال نوری را به‌صورت تصویر در خروجی نمایش می‌دهند از قبیل CCD^۶، ICCD^۷ و Streak Camera؛ در این سامانه‌ها تفکیک عمقی و سطحی هر دو با هم وجود دارد [۲۱ - ۲۲].

سامانه‌های لیدار با توسعه روزافزون خود در زمینه‌های مختلفی استفاده می‌شوند. در سامانه لیدار هوابرد که اساس کار آن مبتنی بر آشکارسازی فوتون‌های پراکنده شده از نوع کشسان است، با نصب سامانه لیدار روی وسیلهٔ پرنده و حرکت در بالای سطح آب، محدودهٔ آبی دلخواه پایش می‌شود، طوری که یک لیزر فرستنده از داخل پرنده، پالسی

معمولاً از روش کلیدزنی Q مشدد لیزر استفاده می‌شود تا پهنای زمانی پالس نوری از مرتبه میکروثانیه به نانوثانیه کاهش یابد. در این روش کلیدزنی، در حین فرایند دمش لیزر، با ایجاد اتلاف درون مشدد لیزر فاکتور کیفیت مشدد پایین نگهداشته می‌شود تا انرژی در محیط فعال لیزری ذخیره شود. سپس برای تولید پالس، اتلاف درون مشدد حذف می‌شود تا انرژی ذخیره شده به صورت یک پالس پرتوان آزاد شود. یکی از بهترین و مطمئن ترین روش‌ها برای سامانه‌های عملیاتی، روش الکترواپتیکی است که در این روش با قرار دادن یک بلور غیرخطی مانند KD*P درون مشدد لیزر و اعمال ولتاژ بالا به آن در ترکیب با یک تیغه چارک موجی می‌توان عمل کلیدزنی را انجام و کنترل کرد. برای تولید نور خروجی قطبیده، همچنین یک قطبنده درون مشدد لیزر قرار داده شده است.

در لیزرهای توان بالا برای استخراج زیاد انرژی ضروری است که حجم محیط فعال افزایش یابد. بدین منظور، قطر میله لیزری بزرگ می‌شود اما این امر خود موجب کاهش کیفیت پرتو خروجی خواهد شد؛ چون عدد فرنل مشدد لیزری افزایش یافته و مدهای مرتبه بالاتر اجازه نوسان پیدا خواهند کرد. از این رو، در لیزرهای انرژی بالا برای به دست آوردن هم‌زمان پرتو خروجی با کیفیت بالا معمولاً از مشدد ناپایدار به جای مشدد پایدار استفاده می‌کنند تا عدد فرنل معادل مشدد کاهش یابد [۲۳]. افزون بر این، به جای آینه‌های معمولی با بازتاب ثابت از آینه‌های با بازتاب متغیر نیز استفاده می‌شود تا پرتو خروجی با توزیع نرم و بدون نوسانات پراشی ناشی از لبه آینه‌ها به دست آید؛ آینه‌های با بازتاب متغیر دارای توزیع بازتابی گاوسی یا سوپر گاوسی به صورت زیر هستند:

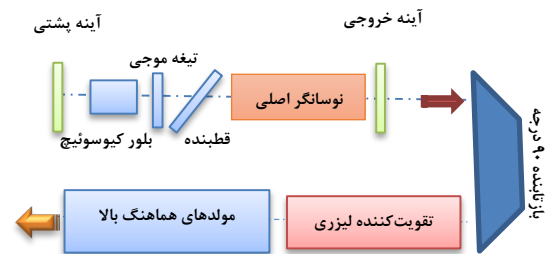
$$R(r) = R_0 \exp\left[-2\left(\frac{r}{\omega_m}\right)^n\right] \quad (3)$$

که r مختصه شعاعی، R_0 بازتاب مرکزی آینه، ω_m اندازه لکه آینه و n نیز مرتبه سوپر گاوسین است. در شکل ۶، توزیع محاسبه شده آینه مورد استفاده آورده شده است.

در این ساختار، پالس خروجی لیزری از نوسانگر اصلی با انرژی پایین، ولی با مشخصات کیفی بالا، پس از عبور از یک محیط لیزری که تقویت کننده نامیده می‌شود تا چند برابر دچار تقویت نوری شده و به سمت بلورهای مولد هماهنگ لیزری هدایت می‌شود. معادله اصلی حاکم بر ضریب بهره در ساختارهای MOPA به صورت معادله زیر است:

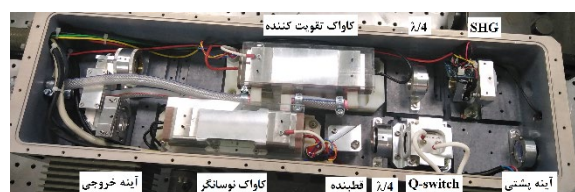
$$G = \frac{E_s}{E_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] G_0 \right\} \quad (2)$$

در این رابطه، E_s چگالی انرژی اشباع ماده لیزری، E_{in} چگالی انرژی سیگنال ورودی به تقویت کننده و G_0 بهره تک عبور است. با یک سیگنال ورودی با انرژی مشخص، می‌توان مقدار بهره ساختار MOPA را محاسبه کرد [۲۳]. در شکل ۴ طرح‌واره‌ای از چیدمان لیزری براساس ساختار MOPA و مولد هماهنگ لیزری ارائه شده است.



شکل ۴. طرح‌واره‌ای از چیدمان لیزری بر اساس ساختار MOPA.

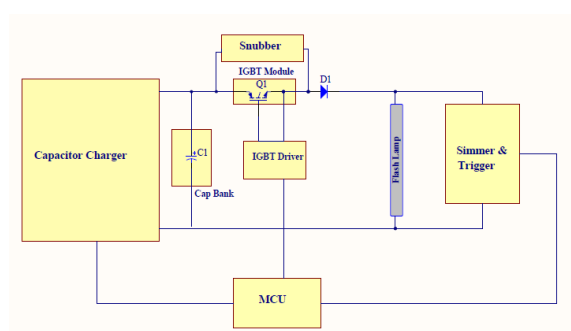
همچنین چیدمان آزمایشگاهی لیزر مولد طول موج ۵۳۲ نانومتری در شکل ۵ آورده شده است. نوسانگر لیزری دارای مشدد ناپایدار و آینه خروجی با بازتاب متغیر است که کیفیت پرتو خوبی را فراهم می‌کند. تقویت کننده نیز شامل یک تک طبقه یک‌بار عبور است که خروجی نوسانگر با کلیدزنی Q را به میزان دو برابر تقویت می‌کند.



شکل ۵. نحوه چیدمان قطعات در محصول لیزر سبز ۵۳۲ نانومتری

به منظور تولید پالس‌های نوری با توان قله‌ای از مرتبه مگاوات در لیزرهای Nd:YAG، مناسب برای کاربردهای لیداری،

درون فلاش لامپ گذرانده می‌شود تا گاز داخل لامپ همواره در حالت یونیزه باقی بماند. در این وضعیت لامپ آماده است تا جریان تخلیه را از خود عبور دهد. در انتها نیز مدار تخلیه، انرژی را از بانک خازنی شارژ شده به فلاش لامپ طی مدت زمان در نظر گرفته انتقال می‌دهد. این کار با قطع و وصل کردن کلید قدرت IGBT انجام می‌شود که در مسیر تخلیه بین بانک خازنی و فلاش لامپ قرار داده شده است. پهنای پالس جریان عبوری از فلاش لامپ، به وسیله پالس فرمان ارسالی از واحد کنترل اصلی MCU به مدار راه انداز گیت کلید IGBT کنترل می‌شود.

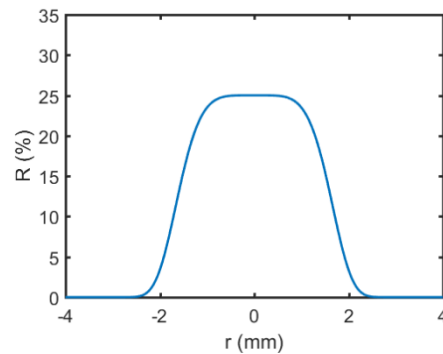


شکل ۷. طرح‌واره مدار راه‌انداز فلاش لامپ با عملکرد پالس مربعی

در ادامه برای تولید هماهنگی دوم ۵۳۲ نانومتر، از بلور غیرخطی KTP با جورشدگی فازی بحرانی نوع دوم استفاده شده است. بلور KTP ضریب غیرخطی بزرگ ($3/18 \text{ pm/V}$) و زاویه پذیرش زیاد ($d_{\text{eff}} = 5 \text{ mrad cm}$) دارد. برای جورشدگی فازی نوع دوم بلور KTP در زوایای $\theta = 90^\circ$ و $\phi = 23/5^\circ$ برش خورده و ابعاد آن $5 \times 13 \times 13$ میلی‌متر است. دمای این بلور غیرخطی در 50° درجه سانتی‌گراد تثبیت شده است. سطوح ورودی و خروجی بلور KTP به ترتیب دارای پوشش ضد بازتاب در طول موج‌های ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر هستند. برای تقسیم انرژی بین هماهنگ اصلی و دوم، از یک تیغه چارک موجی قبل از بلور غیرخطی KTP استفاده شده است که این امر تنظیم بهینه هماهنگ سوم را فراهم می‌کند. جورشدگی قطبش پرتو نیز به صورت زیر است:

$$o(1064 \text{ nm}) + e(1064 \text{ nm}) \rightarrow e(532 \text{ nm})$$

چیدمان آزمایشگاهی لیزر فرابنفش ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتری نیز در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. برای هماهنگ سوم از بلور غیرخطی DKDP با جورشدگی بحرانی نوع دوم استفاده



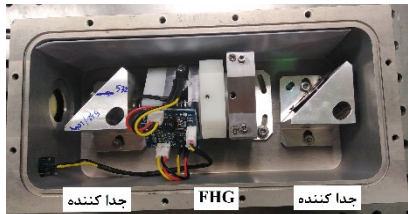
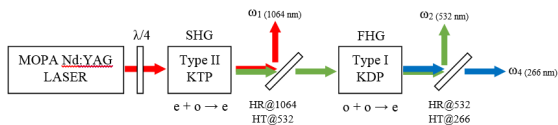
شکل ۶. تصویر آینه با بازتاب متغیر (بالا) و توزیع بازتاب آینه استفاده شده در لیزر (پایین)

به منظور افزایش دو برابری بازده لیزر، دمش یکنواخت‌تر و پایداری زمانی خیلی خوب انرژی خروجی، از منابع تغذیه پالس مربعی به جای منابع تغذیه شبکه شکل دهنده پالس استفاده شده است. این منابع تغذیه به دلیل استفاده از کلیدهای کنترل پذیر روشن و خاموش شونده، امکان تغییر پیوسته پهنای پالس جریان را فراهم می‌کنند و برخلاف منابع تغذیه با شبکه شکل دهنده، نیازی به طراحی در حالت میرای بحرانی و بهینه‌سازی ندارند [۲۴] از این رو تغییر سطح ولتاژ و پهنای پالس جریان در آن‌ها بسیار آسان است. در اینجا برخلاف طرح‌های مشابه موجود، به جای موازی یا سری‌سازی کلیدهای قدرت با جریان یا ولتاژ پایین، برای هر فلاش لامپ تنها از یک تک کلید IGBT استفاده شده است.

در شکل ۷، طرح‌واره مدار راه‌انداز فلاش لامپ پالس مربعی طراحی و ساخته شده لیزر آورده شده است. این منبع تغذیه از چهار بخش اصلی تشکیل شده است: ۱. منبع تغذیه شارژ کننده به همراه بانک خازنی؛ ۲. مدار تریگر؛ ۳. مدار زیمر؛ ۴. مدار تخلیه.

در ابتدا بانک خازنی به وسیله یک منبع تغذیه شارژ کننده با جریان ثابت تا ولتاژ مورد نیاز شارژ می‌شود. سپس مدار تریگر با اعمال یک پالس ولتاژ بالا باعث یونیزه شدن گاز داخل لامپ می‌شود. آنگاه به وسیله مدار زیمر، جریانی تأخیری از

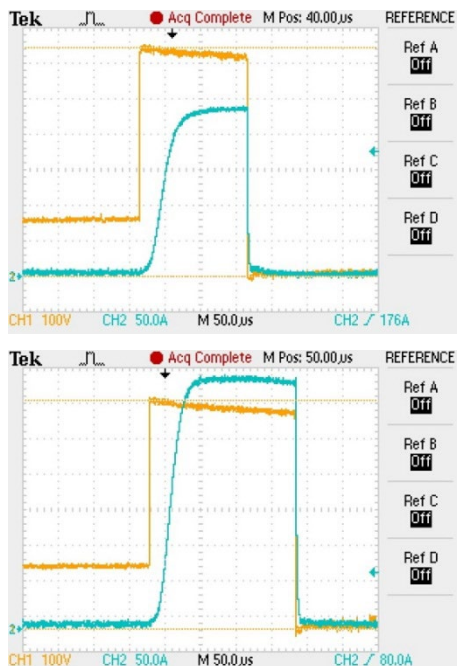
عبوردهنده ۲۶۶ نانومتر به کار گرفته شده است. جورشدگی قطبش پرتو هماهنگ چهارم نیز به صورت $o(532\text{ nm})+o(532\text{ nm})\rightarrow e(266\text{ nm})$ است.



شکل ۹. طرح‌واره چیدمان قطعات لیزر فرابنفش ۲۶۶ نانومتری (شکل بالا) و تصویر چیش قطعات هماهنگ چهارم در محفظه (شکل پایین)

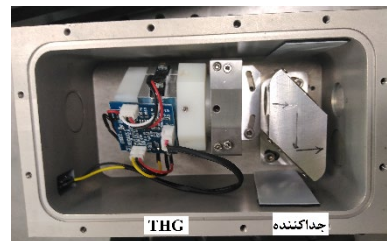
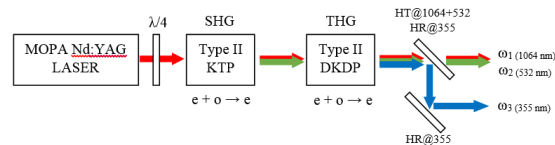
۴. یافته‌ها

در این آزمایش برای تولید هماهنگ‌های سبز-آبی، انرژی لیزر Nd:YAG بر روی مقدار ۱/۱ ژول تنظیم شد؛ در هرکدام از فلش لامپ‌های ساختار نوسانگر و تقویت‌کننده به ترتیب انرژی الکتریکی ۱۷ و ۳۹ ژول تخلیه شد. شکل موج‌های ولتاژ و جریان فلش لامپ‌ها در شکل ۱۰ آورده شده است.



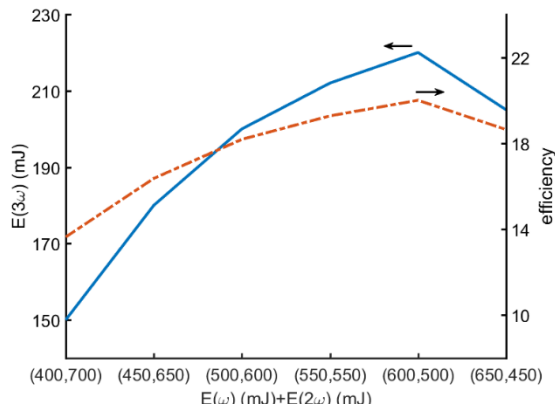
شکل ۱۰. شکل موج جریان (نمودار آبی) و ولتاژ (نمودار نارنجی) فلش لامپ‌های بخش نوسانگر (بالا) و بخش تقویت‌کننده (پایین) لیزر ۱۰۶۴

شده که در زوایای $\theta=59/3^\circ$ و $\phi=0^\circ$ برش خورده است. بلور DKDP برای کاربردهای پالسی انرژی بالا در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، به دلیل آستانه تخریب بالا (5 J/cm^2) بسیار مناسب است. پهنای باند دمایی این بلور، (30°C cm)، همچنین بالاست. بلور DKDP دارای سطوح ورودی و خروجی به ترتیب با پوشش ضد بازتاب در طول موج‌های $1064 + 532 + 266$ نانومتر با ابعاد $15 \times 15 \times 20$ میلی‌متر است. این بلور غیرخطی تا دمای 40°C درجه سانتی‌گراد گرم شده است. مطابق شکل ۸، به منظور جداسازی خروجی ۳۵۵ نانومتر از ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر، از دو جداکننده عبوری ۱۰۶۴ + ۵۳۲ نانومتر و تمام بازتابنده ۳۵۵ نانومتر استفاده شده است. جورشدگی قطبش پرتو برای هماهنگ سوم نیز به صورت $o(532\text{ nm})+e(1064\text{ nm})\rightarrow e(355\text{ nm})$ است.



شکل ۸. طرح‌واره چیدمان قطعات برای تولید لیزر در طول موج ۳۵۵ نانومتری (شکل بالا) و چیش قطعات مولد هماهنگ سوم در محفظه (شکل پایین)

تولید هماهنگ چهارم به وسیله بلور KDP انجام شده که آستانه تخریب بالایی 8 GW/cm^2 دارد که در مقایسه با بلور DKDP جذب آن در ناحیه فرابنفش کمتر است. بلور KDP با جورشدگی فازی بحرانی نوع دوم در زوایای $\theta=76/5^\circ$ و $\phi=45^\circ$ برش خورده که سطوح ورودی و خروجی آن به ترتیب دارای پوشش ضد بازتاب ۵۳۲ و ۲۶۶ نانومتری است. این بلور غیرخطی نیز تا دمای 40°C درجه سانتی‌گراد گرم شده و ابعاد آن $15 \times 15 \times 7$ میلی‌متر است. در ورودی این بخش، از یک جداکننده تمام بازتابنده ۱۰۶۴ نانومتر و تمام عبوردهنده ۵۳۲ نانومتر استفاده شده است. در خروجی نیز مطابق شکل ۹، یک جداکننده تمام بازتابنده ۵۳۲ نانومتر و تمام

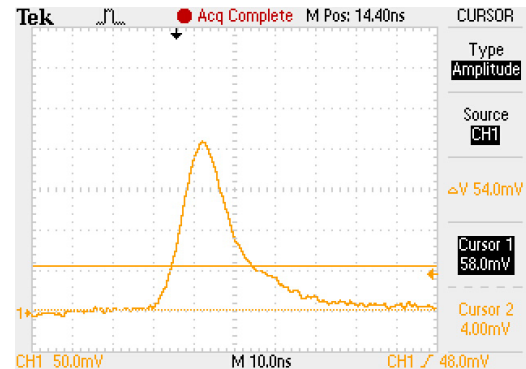


شکل ۱۳. انرژی هماهنگ سوم برحسب ترکیب‌های مختلف انرژی‌های هماهنگ اول و دوم و بازده تبدیل نوری به نوری متناظر آن

در شکل ۱۳، انرژی خروجی هماهنگ سوم (۳۵۵nm) به ازای نسبت‌های مختلف انرژی هماهنگ اول و دوم نشان داده شده است که انتخاب این نسبت‌های مختلف، با چرخش تیغه چارک‌موجی انجام شده است. مطابق این شکل، انرژی هماهنگ سوم در حالت انرژی حداکثری هماهنگ دوم، یعنی همان مقدار ۷۰۰ میلی‌ژول، بهینه نیست. در واقع زمانی که انرژی هماهنگ دوم به ۵۰۰ میلی‌ژول کاهش یابد و انرژی هماهنگ اصلی روی ۶۰۰ میلی‌ژول تنظیم شود، انرژی خروجی هماهنگ سوم به مقدار بیشینه ۲۲۰ میلی‌ژول خواهد رسید که این در مقایسه با انرژی خروجی متناظر با حالت بهینه هماهنگ دوم (یعنی ۱۵۰ میلی‌ژول)، ۴۷ درصد افزایش یافته است. در این حالت، بازده تبدیل نوری به نوری هماهنگ سوم ۲۰ درصد و بازده کلی سامانه ۰/۳ درصد است.

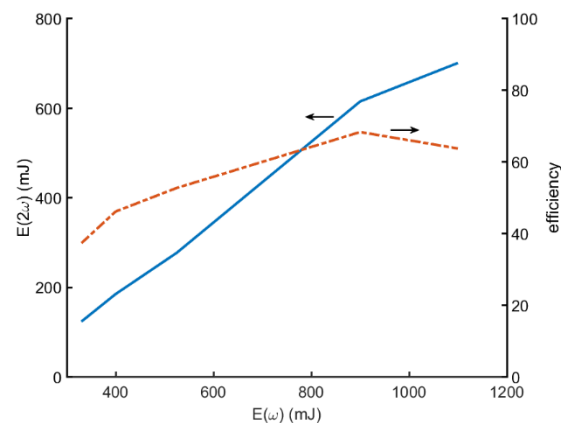
انرژی خروجی هماهنگ چهارم (۲۶۶nm) برحسب انرژی هماهنگ دوم نیز در شکل ۱۴ آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود مقدار انرژی هماهنگ چهارم با افزایش انرژی هماهنگ دوم افزایش می‌یابد. حداکثر انرژی خروجی به دست آمده هماهنگ چهارم در این آزمایش، در حدود ۶۵ میلی‌ژول است که بازده تبدیل نوری به نوری متناظر با آن ۹ درصد و بازده کلی سامانه تقریباً ۰/۱ درصد می‌شود.

بازده کلی لیزر ۱۰۶۴ نانومتری، یعنی بازده الکترونیکی به نوری، در حدود ۱/۵ درصد است. مشخصات پرتو خروجی لیزر از قبیل قطر لکه و واگرایی میدان دور به ترتیب ۱۰ میلی‌متر و ۱/۵ میلی‌رادیان و مطابق شکل ۱۱، پهنای پالس لیزر نیز ۱۱ نانوثانیه اندازه‌گیری شد.

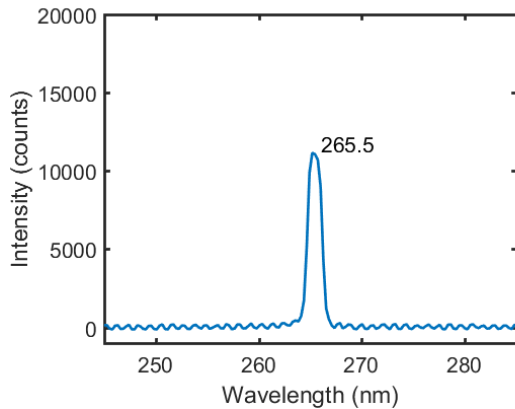


شکل ۱۱. شکل پالس نوری اندازه‌گیری شده پرتو خروجی لیزر ۱۰۶۴

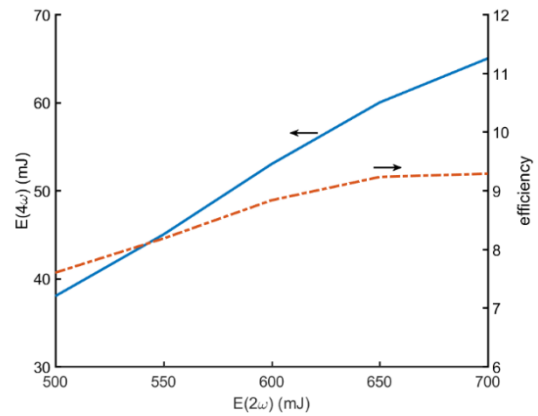
برای بیشینه کردن انرژی تبدیلی به هماهنگ دوم (۵۳۲nm)، با جهت‌گیری مناسب بلور KTP و تیغه چارک‌موجی قبل از بلور، می‌توان به انرژی ۷۰۰ میلی‌ژول معادل با بازده تبدیل نوری به نوری ۶۴ درصد و بازده کلی سامانه به میزان یک درصد دست یافت. حال با چرخش تیغه چارک‌موجی از حالت بهینه خود، انرژی خروجی هماهنگ دوم (۵۳۲nm) کاهش یافته و امکان تنظیم این انرژی خروجی روی مقدار دلخواه فراهم می‌شود؛ نمودار تغییرات انرژی هماهنگ دوم برحسب انرژی لیزر ۱۰۶۴ در شکل ۱۲ آورده شده است.



شکل ۱۲. انرژی هماهنگ دوم برحسب انرژی هماهنگ اول و بازده تبدیل نوری به نوری متناظر آن



شکل ۱۷. نمودار طیف اندازه‌گیری شده هماهنگ چهارم



شکل ۱۴. انرژی هماهنگ چهارم برحسب انرژی هماهنگ دوم و بازده تبدیل نوری به نوری متناظر آن

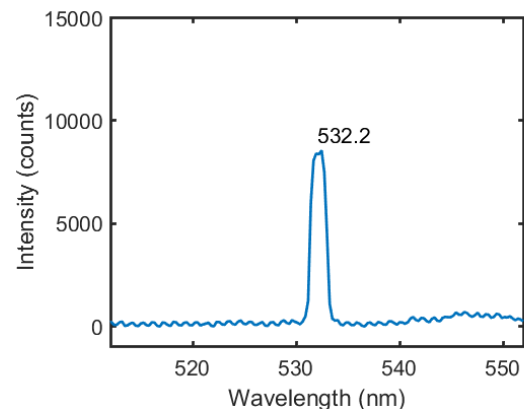
۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تولید هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم یک لیزر Nd:YAG پالسی، مناسب برای کاربردهای لیدار دریایی، انجام شده است. با انرژی دمش ۱/۱ ژول و بلور KTP با جورشدهگی فازی نوع دوم، انرژی ۷۰۰ میلی‌ژول در هماهنگ دوم با طول موج ۵۳۲ نانومتر به دست آمد. استفاده از بلور DKDP با جورشدهگی فازی نوع دوم برای هماهنگ سوم، نیز به انرژی ۲۲۰ میلی‌ژول در طول موج ۳۵۵ نانومتر منجر شد. بلور KDP با جورشدهگی نوع اول هم برای تولید هماهنگ چهارم استفاده شد که ۶۵ میلی‌ژول در طول موج ۲۶۶ نانومتر حاصل آمد. بازده تبدیل انرژی لیزر Nd:YAG در هماهنگ‌های دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۶۴، ۲۰ و ۹ درصد است. در جدول ۱ نیز نتایج مقایسه پارامترهای خروجی این تحقیق با پارامترهای سامانه‌های لیزری موجود (با انرژی در طول موج اصلی تقریباً نزدیک) ارائه شده است.

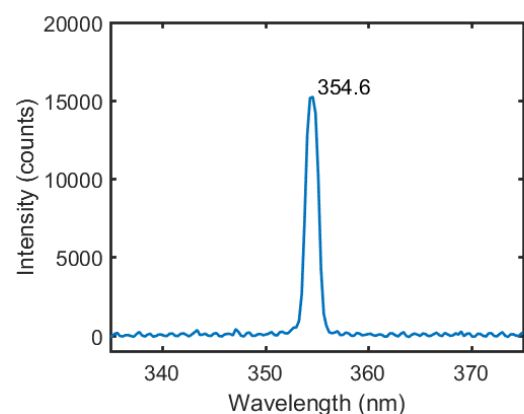
جدول ۱. مقایسه پارامترهای این تحقیق با محصولات موجود

عنوان پارامتر	شرکت quanel (Q-Smart1200)	شرکت Litron (LPY764G-10)	نتایج این تحقیق
انرژی لیزر در طول موج اصلی (mJ)	۱۲۰۰	۱۲۵۰	۱۱۰۰
انرژی لیزر در هماهنگ دوم (mJ)	۵۷۵	۶۷۵	۷۰۰
انرژی لیزر در هماهنگ سوم (mJ)	۲۸۰	۲۲۵	۲۲۰
انرژی لیزر در هماهنگ چهارم (mJ)	۱۱۰	۱۲۵	*۶۵

* به دلیل عدم دسترسی به بلور مناسب بهینه‌سازی انجام نشده است.



شکل ۱۵. نمودار طیف اندازه‌گیری شده هماهنگ دوم



شکل ۱۶. نمودار طیف اندازه‌گیری شده هماهنگ سوم

sensed inherent optical properties in oligotrophic waters. *Optics Express*. 2019; 27: 34974- 34984.

- [14] Lee Z, Wei J, Voss K, Lewis M, Bricaud A, Huot Y. Hyperspectral absorption coefficient of "pure" seawater in the range of 350–550 nm inverted from remote sensing reflectance. *Applied Optics*. 2015; 54: 546-558.

[15] فرمانی فاطمه و همکاران. بررسی طیفی و بهینه‌سازی پرتودهی هماهنگ دوم و چهارم لیزر Nd:YAG. بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران. ۱۳۹۳.

[16] منصوره معصومه و همکاران. کاهش زاویه Walk-off برای پرتو هماهنگ سوم لیزر Nd:YAG با استفاده از تیغه اپتیکی BK7. کنفرانس فیزیک ایران. ۱۳۹۳.

- [17] Kojima T, Konno S, Fujikawa S, Yasui K. High-Power Fourth-Harmonic Generation of Nd:YAG Laser. *Electrical Engineering in Japan*. 2001; 137:18-25.

- [18] Chen J, Zheng Y, An N, Chen X. Noncollinear third-harmonic generation with large angular acceptance by noncritical phase matching in KDP crystal. *Opt Lett*. 2015; 40: 4484-4487.

- [19] Available from: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_vibrational_spectrum.html.

- [20] Measures RM. *Laser remote sensing: fundamentals and applications*. J. Wiley; 1984.

- [21] Dho, SW, Park YJ, Kong HJ. *Laser Remote Sensing Laser Remote Sensing*, 1984. *Optical review*, 1997. 4(4): 521-526.

- [22] Shibata T, Kobuchi M, Maeda M. Measurements of density and temperature profiles in the middle atmosphere with a XeF lidar. *Applied optics*, 1986. 25(5): p. 685-688.

- [23] Hodgson N, Weber H. *Optical resonators: fundamentals, advanced concepts and applications*. Springer; 1997.

- [24] Markiewicz JP, Emmett JL. Design of flashlamp driving circuits. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1966; 2: 707-711.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مادی و معنوی پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر انجام شده است، بدین وسیله از همه کسانی که در انجام این پژوهش ما را یاری کرده‌اند؛ کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [1] Pierce JW, Beausoleil RC. High efficiency fourth harmonic generation. *SPIE*. 2016; 2379: 265-281.

- [2] Qi H, Wang Z, Yu F, Sun X, Xu X, Zhao X. Cascaded third-harmonic generation with one KDP crystal. *Opt Lett*. 2016; 41: 5823-5826.

- [3] Yang ST, Hennesian MA, Weiland TL, Vickers JL, Luthi RL. Noncritically phase-matched fourth harmonic generation of Nd:glass lasers in partially deuterated KDP crystals. *Opt Lett*. 2011; 36: 1824–1826.

- [4] Ji S, Zhang S, Xu M, Liu B, Zhuand L et al. Non-critical phase-matching conditions for fourth harmonic generation of DKDP crystal. *Opt Mater Express*. 2012; 2: 735-739.

- [5] Wang F, Li F, Chai X, Wang L, Han W and et al. Efficient fourth harmonic generation of Nd:glass lasers in ADP and DKDP crystals. *SPIE*. 2015; 9255: 92551R.

- [6] Ciapponi A, Riedel W, Tzeremes G, Schröder H, Peter Mahnke. Non-linear optical frequency conversion crystals for space applications. *SPIE* 2011; 7912: 791205.

- [7] Durand Y, Caron J, Hélière A, Bézy JL, Meynard R. LIDAR technology developments in support of ESA Earth observation missions. *SPIE*. 2008; 10566: 105661F.

- [8] Pe'eri S, Morgan CW, Philpot, William D, Guenther G, Armstrong A. Lidar as a Shoreline Mapping Tool U.S. Hydrographic Conference. 2007; 399.

- [9] Available from: <https://geo-matching.com/uploads/defaults/l/e/leica-hawkeye-ds-877846-1018-en-lr.pdf>.

- [10] Available from: <https://data.ngdc.noaa.gov/instruments/remote-sensing/active/profilers-sounders/lidar-laser-sounders/Fugro-LADS-Mk3.pdf>.

- [11] Available from: <https://geo-matching.com/uploads/default/m/i/migrationjzk5ct.PDF>.

- [12] Mason JD, Cone MT, Fry ES. Ultraviolet (250–550 nm) absorption spectrum of pure water. *Applied Optics*. 2016; 55: 7163-7172.

- [13] Yu X, Lee Z, Wei J, Shang S. Impacts of pure seawater absorption coefficient on remotely

پی‌نوشت

1. Light Detection and Ranging.
2. Field of View.
3. Photo-Multiplier Tube.
4. Avalanche Photodiode.
5. Mercury Cadmium Telluride.
6. Charge Coupled Device.
7. Intensified CCD.
8. Master Oscillator Power Amplifier.
9. Insulated-Gate Bipolar Transistor.