بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

طراحی و ساخت هماهنگ‌های سوم و چهارم لیزر Nd:YAG تپی

مجید بابایی توسکی[۱]، علیرضا پژ[۲]، عباس ملکی و حسن عبادیان

مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

Majid۲۰۱۷bt@gmail.com[۱] , Alireza.pezh@gmail.com[۲]

چکیده – در این مقاله، تولید هماهنگ‌های سوم و چهارم برای لیزر Nd:YAG تپی ارائه می‌شود. بلورهای DKDP با جورشدگی فازی نوع دوم و KDP با جور شدگی نوع اول به ترتیب برای تولید طول موج‌های ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتر استفاده شده است. بوسیله یک لیزر Nd:YAG با کلیدزنی Q و انرژی ۱/۱ ژول و بلور KTP با جور شدگی فازی نوع دوم برای تولید هماهنگ دوم، حداکثر انرژی ۲۲۰ میلی ژول در ۳۵۵ نانومتر و ۶۵ میلی ژول در ۲۶۶ نانومتر بدســـت آمد. بازده تبدیل انرژی در هماهنگ ســـوم و چهارم به ترتیب ۲۰ و ۹ درصد است.

کلید واژه- تولید هماهنگ، جورشدگی فازی، لیزر Nd:YAG .

Design and Fabrication of the Third and Fourth-Harmonics of Pulsed Nd:YAG Laser

Majid Babaiy Tooski, Alireza Pezh, Abbas Maleki and Hassan Ebadian

Majid۲۰۱۷bt@gmail.com[۱] , Alireza.pezh@gmail.com[۲]

Faculty of Applied Sciences, Malek Ashtar University of Technology

Abstract- In this paper, a third and fourth harmonic generation scheme is proposed for pulsed Nd:YAG laser. Type II phase-matching DKDP and type I phase-matching KDP were used to generate ۳۵۵ and ۲۶۶ nm output wavelengths, respectively. With a ۱٫۱ J Q-switched Nd:YAG laser and a type II phase-matching KTP used for frequency doubling, the maximum ۲۲۰ mJ energy of ۳۵۵ nm and the highest ۶۵ mJ energy of ۲۶۶ nm was obtained. The energy conversion efficiency for the third and fourth harmonics was ۲۰ and ۹٪, respectively.

Keywords: harmonic generation, phase-matching, Nd:YAG laser.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

مقدمه

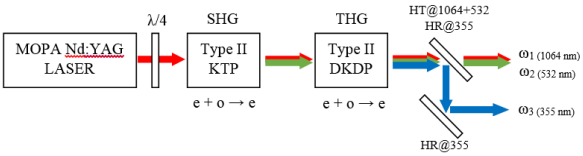
کاربردهای صنعتی و تجاری متعددی برای هماهنگ‌های سوم و چهارم لیزر Nd:YAG با طول موج‌های ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتر وجود دارد که از جمله می‌توان به فوتولیتوگرافی مواد نیمرسانا، میکروماشین، پردازش مواد، طیف سنجی و غیره اشاره نمود [۱-۵].

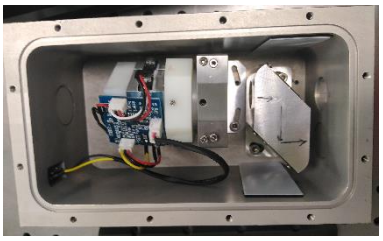
تولید هماهنگ در منابع لیزری، معمولاً از طریق فرآیندهای غیرخطی و با استفاده از مواد نوری غیرخطی انجام می شود [۶ و ۷]که در اینجا از بلورهای غیرخطی KDP و DKDP استفاده شده است. این بلورها دارای خصوصیات عالی از قبیل ضریب غیرخطی متوسط، آستانه آسیب بالا، موجود در اندازه‌های بزرگ با کیفیت اپتیکی بالا و ارزان قیمت هستند که برای تولید هماهنگ‌های سوم و چهارم لیزر Nd:YAG تپی مناسب می‌باشند [۸ و ۹].

چیدمان آزمایشگاهی

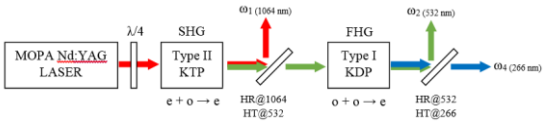
چیدمان آزمایشگاهی لیزر فرابنفش ۳۵۵ و ۲۶۶ نانومتری در شکل ۱ و ۲ آورده شده است. برای دمش بلورهای غیرخطی، در اینجا از یک لیزر Nd:YAG تپی با ساختار نوسانگر-تقویت کننده MOPA استفاده شده است. نوسانگر لیزری دارای مشدد ناپایدار و آینه خروجی با بازتاب متغیر است که کیفیت پرتو خوبی را فراهم می‌کند. تقویت کننده نیز شامل یک تک طبقه یکبار عبور است که خروجی نوسانگر با کلیدزنی Q را به میزان دو برابر تقویت می‌کند.

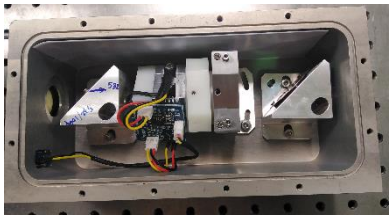
برای تولید هماهنگ دوم ۵۳۲ نانومتر، از بلور غیر خطی KTP با جورشدگی فازی بحرانی نوع دوم استفاده شده است. بلور KTP دارای ضریب غیرخطی بزرگ (۳/۱۸ pm/V $=d_{eff}$) و زاویه پذیرش زیاد (۵ mard cm) است. برای جورشدگی فازی نوع دوم بلور KTP در زوایای $\theta=90^{o}$ و $\varphi=23/5^{o}$ برش خورده و ابعاد آن ۱۳×۱۳×۵ میلی متر است. دمای این بلور غیرخطی در ۵۰ 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 استفاده شده است که این امر تنظیم بهینه هماهنگ سوم را فراهم می‌کند. جورشدگی قبطش پرتو نیز بصورت $o(1064\ nm)+e(1064\ nm)\rightarrow e(532\ nm)$ است.





شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی لیزر فرابنفش ۳۵۵ نانومتری (شکل بالا) و تصویر بخش هماهنگ سوم (شکل پایین).





شکل ۲: چیدمان آزمایشگاهی لیزر فرابنفش ۲۶۶ نانومتری (شکل بالا) و تصویر بخش هماهنگ چهارم (شکل پایین).

برای هماهنگ سوم نیز از بلور غیرخطی DKDP با جورشدگی بحرانی نوع دوم استفاده شده که در زوایای $\theta=59/3^{o}$ و $\varphi=0^{o}$ برش خورده است. بلور DKDP برای کاربردهای تپی انرژی بالا در طول موج ۱۰۶۴نانومتر، به دلیل آستانه تخریب بالا (۵ J/cm^{2}) بسیار مناسب است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

پهنای باند دمایی این بلور، (۳۰ ^{o}C cm)، همچنین بالا است. بلور DKDP دارای سطوح ورودی و خروجی به ترتیب با پوشش ضد بازتاب در طول موج‌های ۱۰۶۴ + ۵۳۲ و ۳۵۵ نانومتر با ابعاد ۱۵×۱۵×۲۰ میلی‌متر است. این بلور غیر خطی تا دمای ۴۰ درجه سانتیگراد گرم شده است. به منظور جداسازی خروجی ۳۵۵ نانومتر از ۱۰۶۴ و ۵۳۲ نانومتر، مطابق شکل ۱، از دو جدا کننده عبوری ۱۰۶۴ + ۵۳۲ نانومتر و تمام بازتابنده ۳۵۵ نانومتر استفاده شده است. جورشدگی قبطش پرتو برای هماهنگ سوم بصورت o(۵۳۲ nm)+e(۱۰۶۴ nm)⟶e(۳۵۵ nm) است.

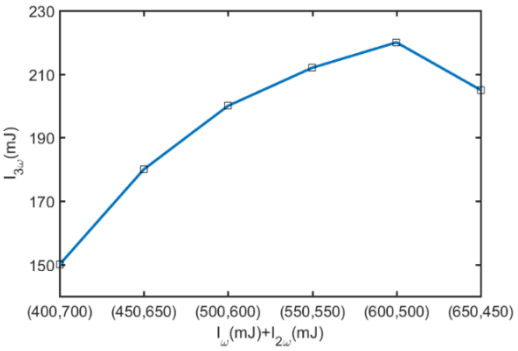
تولید هماهنگ چهارم بوسیله بلور KDP انجام شده که دارای آستانه تخریب بالا ۸ GW/cm^{۲} است که در مقایسه با بلور DKDP جذب آن در ناحیه فرابنفش کمتر است. بلور KDP با جورشدگی فازی بحرانی نوع دوم در زوایای $\theta=۷۶/۵^{o}$ و $\varphi=۴۵^{o}$ برش خورده که سطوح ورودی و خروجی آن به ترتیب دارای پوشش ضد بازتاب ۵۳۲ و ۲۶۶ نانومتری است. این بلور غیرخطی نیز تا دمای ۴۰ درجه سانتیگراد گرم شده و ابعاد آن ۱۵×۱۵×۷ میلی متر است. در ورودی این بخش، از یک جدا کننده تمام بازتابنده ۱۰۶۴ نانومتر و تمام عبوردهنده ۵۳۲ نانومتر استفاده شده است. در خروجی نیز مطابق شکل ۲، یک جداکننده تمام بازتابنده ۵۳۲ نانومتر و تمام عبور دهنده ۲۶۶ نانومتر بکار گرفته شده است. جورشدگی قبطش پرتو هماهنگ چهارم نیز بصورت o(۵۳۲ nm)+o(۵۳۲ nm)⟶e(۲۶۶ nm) است.

نتایج آزمایشگاهی

برای تولید هماهنگ‌ها در این آزمایش، انرژی خروجی لیزر Nd:YAG روی مقدار ۱/۱ ژول تنظیم شد. همچنین مشخصات پرتو خروجی از قبیل قطر لکه، واگرایی میدان دور و پهنای تپ به ترتیب ۱۰ میلی متر، ۱/۵ میلی رادیان و ۸ نانوثانیه اندازه‌گیری گردید.

با جهت‌گیری مناسب بلور KTP و تیغه چارک موجی قبل از آن، انرژی بیشینه ۷۰۰ میلی ژول در هارمونیک دوم (۵۳۲nm) با بازده تبدیل ۶۴ درصد بدست آمد که با چرخش تیغه چارک موجی از حالت بهینه خود، انرژی خروجی هارمونیک دوم (۵۳۲nm) کاهش می‌یابد و امکان تنظیم انرژی روی مقدار دلخواه فراهم می‌شود.

شکل ۳، انرژی خروجی هماهنگ سوم (۳۵۵nm) را به ازای نسبت‌های مختلف انرژی هماهنگ اول و دوم نشان می‌دهد که این نسبت‌ها با چرخش تیغه چارک موجی انتخاب شده است. همانطور که مشاهده می‌شود انرژی هماهنگ سوم در حالت انرژی حداکثری هماهنگ دوم، یعنی ۷۰۰ میلی ژول، بهینه نیست. زمانی که انرژی هماهنگ دوم به ۵۰۰ میلی ژول کاهش می‌یابد و انرژی هماهنگ اصلی به ۶۰۰ میلی ژول می‌رسد، انرژی خروجی هماهنگ سوم ۲۲۰ میلی ژول می‌شود که در مقایسه با انرژی متناظر با حالت بهینه هماهنگ دوم (۱۵۰ میلی ژول)، ۴۷ درصد افزایش یافته است. از این رو، بازده تبدیل هماهنگ سوم در این حالت، ۲۰ درصد می‌شود.

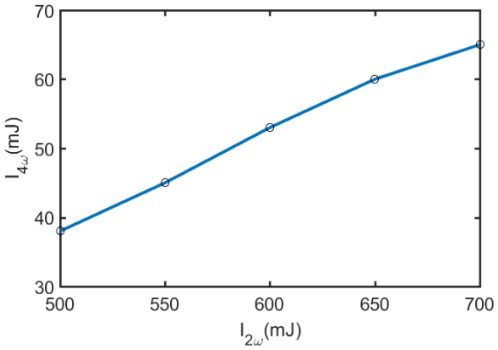


شکل ۳: انرژی خروجی هماهنگ سوم بر حسب ترکیب انرژی‌های هماهنگ اول و دوم.

انرژی خروجی هماهنگ چهارم (۲۶۶nm) بر حسب انرژی هماهنگ دوم در شکل ۴ آورده شده است. همانطور که انتظار می‌رود مقدار انرژی هماهنگ چهارم با افزایش انرژی هماهنگ دوم افزایش می‌یابد. حداکثر انرژی خروجی بدست

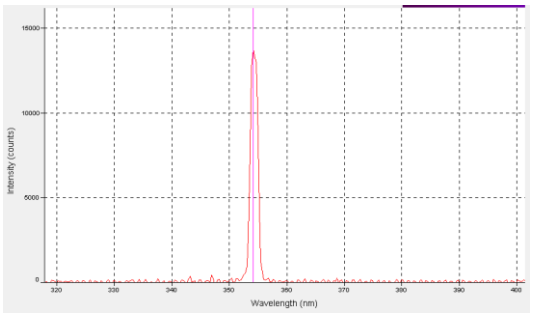
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

آمده هماهنگ چهارم در این آزمایش، در حدود ۶۵ میلی ژول است که بازده تبدیل متناظر با آن هم ۹ درصد می‌شود.

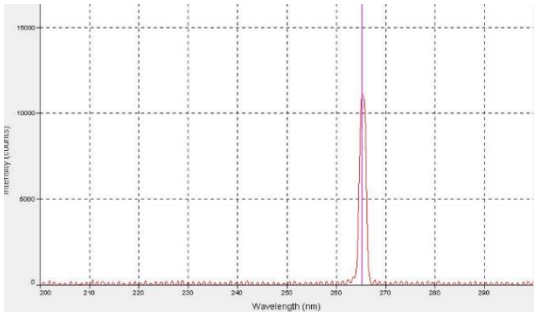


شکل ۴: انرژی خروجی هماهنگ چهارم بر حسب انرژی هماهنگ دوم.

در شکل‌های ۵ و ۶، طیف خروجی هماهنگ‌های سوم و چهارم، اندازه‌گیری شده با طیف سنج Ocean Optics مدل HR۴۰۰۰CG-UV-NIR ، آورده شده است.



شکل ۵: طیف اندازه‌گیری شده هماهنگ سوم.



شکل ۶: طیف اندازه‌گیری شده هماهنگ چهارم.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، تولید هماهنگ‌های سوم و چهارم لیزر Nd:YAG تپی انجام شده است. با استفاده از بلور DKDP با جورشدگی فازی نوع دوم برای هماهنگ سوم، انرژی ۲۲۰ میلی ژول در طول موج ۳۵۵ نانومتر بدست آمد. بلور KDP با جورشدگی نوع اول نیز برای تولید هماهنگ چهارم استفاده شد که ۶۵ میلی ژول در طول موج ۲۶۶ نانومتر بدست آمد. بازده تبدیل انرژی در هماهنگ سوم و چهارم به ترتیب ۲۰ و ۹ درصد است.

مرجع‌ها

[۱] J. W. Pierce, R. C. Beausoleil, “High efficiency fourth harmonic generation”, SPIE, Vol. ۲۳۷۹, pp. ۲۶۵-۲۸۱, ۲۰۱۶.

[۲] H. Qi, Z. Wang, F. Yu, X. Sun, X. Xu, X. Zhao, “Cascaded third-harmonic generation with one KDP crystal”, Opt. Lett. , Vol. ٤١, pp. ٥٨٢٣-٥٨٢٦, ٢٠١٦.

[۳] S. T. Yang, M. A. Henesian, T. L. Weiland, J. L. Vickers, R. L. Luthi, “Noncritically phase-matched fourth harmonic generation of Nd:glass lasers in partially deuterated KDP crystals”, Opt. Lett., Vol. ۳۶, □□. ۱۸۲۴□۱۸۲۶, ۲۰۱۱.

[٤] S. Ji, S. Zhang, M. Xu, B. Liu, L. Zhu and et al., “Non-critical phase-matching conditions for fourth harmonic generation of DKDP crystal”, Opt. Mater. Express, Vol. ۲, pp. ۷۳۵-۷۳۹, ۲۰۱۲.

[۵] F. Wang, F. Li, X. Chai, L. Wang, W. Han and et al., “Efficient fourth harmonic generation of Nd:glass lasers in ADP and DKDP crystals”, SPIE, Vol. ۹۲۵۵, pp. ۹۲۵۵۱R, ۲۰۱۵.

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

[۷] معصومه منصوری و همکاران، کاهش زاویه WaLK-off برای پرتو هماهنگ سوم لیزر Nd:YAG با استفاده از تیغه اپتیکی BK۷، کنفرانس فیزیک ایران، ۱۳۹۳.

[۸] T. Kojima, S. Konno, S. Fujikawa, K. Yasui, “High-Power Fourth-Harmonic Generation of Nd:YAG Laser”, Electrical Engineering in Japan, Vol. ۱۳۷, pp. ۱۸-۲۵ , ۲۰۰۱.

[۹] J. Chen, Y. Zheng, N. An, X. Chen, “Noncollinear third-harmonic generation with large angular acceptance by noncritical phase matching in KDP crystal”, Opt. Lett., Vol. ٤٠, pp. ٤٤٨٤-٤٤٨٧, ٢٠١٥.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]