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

مقایسه تولید هماهنگ‌دوم داخل و خارج مشددی در لیزر نئودمیوم یاگ تپی نانوثانیه با نرخ تکرار از مرتبه کیلوهرتز

مهدی مسائلی، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

mahdi.ms۲۲@yahoo.com, a_arabanian@sbu.ac.ir, r-massudi@sbu.ac.ir

چکیده - تولید هماهنگ‌دوم(SHG) از یک باریکه لیزر در طیف مادون قرمز با استفاده از بلورهای غیرخطی، یک روش موثر برای تولید باریکه لیزر در ناحیه مرئی است. در این مقاله، به ارائه‌ی یک چیدمان برای تولید پربازده لیزر سبز تپی نانوثانیه توسط تولید هماهنگ‌دوم درون مشددی لیزر نئودمیوم یاگ یک طرف دمش شده‌ی طولی، پرداخته می‌شود. بدین منظور یک مشدد L-شکل طوری طراحی شده است که عدسی حرارتی ایجاد شده در محیط فعال در اثر دمش لیزر، به خوبی جبران شود و پایداری مشدد در گستره ۱ تا ۲۰ وات برقرار گردد. سپس به مقایسه توان هماهنگ‌دوم خروجی از این چیدمان با چیدمان تولید هماهنگ‌دوم خارج مشددی پرداخته می‌شود. هر دو نتایج شبیه سازی و تجربی، افزایش ۳۰ برابری توان سبز خروجی از چیدمان هماهنگ‌دوم داخل مشددی را نسبت به خارج مشددی نشان می‌دهد.

کلید واژه- پایداری مشدد،تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی، دمش طولی،عدسی حرارتی

Comparison of the intracavity and extra cavity of second harmonic generation in a nanosecond pulsed Nd:YAG laser with a repetition rate of the order of KHz

Mahdi masaeli , Atoosa Sadat Arabanian and Reza Massudi

Laser and plasma research institute of Shahid Beheshti university,Tehran,Iran

mahdi.ms۲۲@yahoo.com, a_arabanian@sbu.ac.ir, r-massudi@sbu.ac.ir

Abstract- An effective method to produce a laser beam in the visible region is second harmonic generation (SHG) from a laser beam in the infrared spectrum using nonlinear crystals. In this paper, an arrangement for the high-efficiency production of a nanosecond pulsed green laser is presented by intracavity second harmonic generation of a longitudinally pumped Nd:YAG laser. For this purpose, a L-shaped cavity is designed in such a way that the created thermal lens in the active medium due to laser pomp well compensated and the stability of the cavity is in established a range of ۱ to ۲۰ watts. Then, output power of SHG in this arrangement is compared with that of extra cavity SHG. Both simulation and experimental results illustrate a ۳۰-fold. increase of the output green power of the arrangement with the intracavity second harmonic generation compared to the extra cavity.

Keywords: cavity stability, intracavity second harmonic generation, longitudinally pump, thermal lens

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

امروزه لیزرهای حالت جامد تپی از مرتبه‌ی نانوثانیه با نرخ تکرار بالا و در ناحیه طول‌موجی مرئی، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های فاصله‌یابی لیزری و لیدارها، ارتباطات فضایی، مطالعه‌ی اثرات غیرخطی و به ویژه در دمش لیزرهای تنظیم پذیر مانند لیزرهای تیتانیوم سفایر دارند[۱-۳]. از طرفی تولید هماهنگ‌دوم(SHG) از یک باریکه لیزر در طیف مادون قرمز با استفاده از بلورهای غیرخطی، یک روش موثر برای تولید باریکه لیزر در ناحیه مرئی است. به طور معمول برای تولید هماهنگ‌دوم از سیستم‌های لیزر حالت جامد تپی با نرخ تکرار بالا، بلورغیرخطی را در خروجی لیزر با طیف مادون قرمز قرار می‌دهند. برای افزایش بازده تبدیل، باریکه خروجی از لیزر بر روی بلور شدیدا کانونی می‌شود که احتمال آسیب به پوشش‌های روی بلورغیرخطی را افزایش می‌دهد. با قرار دادن بلورغیرخطی درون مشدد و تکیه بر توان قله‌ی در گردش بالای باریکه درون مشدد لیزر می‌توان نیاز به تمرکز باریکه بر روی بلور را کاهش داد.

از سوی دیگر، لیزرهای حالت جامد دمش شده‌ی طولی، دارای مزیت‌هایی مانند بازده همپوشانی بالا و کیفیت باریکه خوب هستند که کمک زیادی برای تولید هماهنگ‌دوم درون مشددی با بازده بالا می‌کند. با افزایش ضریب بازتاب آینه‌ی خروجی و بهینه سازی تطبیق مد دمش و مد لیزر در محیط بهره می‌توان شدت باریکه اصلی درون مشدد را به طور قابل توجهی افزایش داد. مسئله‌ی ایجاد شده در این مشددها، عدسی حرارتی قوی‌ای است که درتوان‌ها بالا ایجاد می‌شود و باعث می‌شود تا مشدد در توان‌های بالا از حالت پایدار خارج شود. بنابراین مشدد لیزر باید طوری طراحی شود تا لیزر در بازه توانی مورد نظر پایداری خود را حفظ کند. در این مقاله، ابتدا طراحی و ساخت یک چیدمان پایدار برای تولید لیزر سبز تپی توسط تولید هماهنگ‌دوم درون مشددی یک لیزر نئودمیوم یاگ یک‌طرف دمش شده‌ی طولی انجام می‌شود و سپس به مقایسه توان هماهنگ‌دوم خروجی از این چیدمان با چیدمان تولید هماهنگ‌دوم خارج مشددی پرداخته می‌شود.

مبانی نظری

در فرآیند هماهنگ‌دوم دو فوتون با فرکانس ω با هم ترکیب شده و فوتونی با فرکانس ۲ω را تولید می‌کنند. بازده تبدیل این فرآیند از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید[۳]:

$$e_{SHG} = tanh^{۲}\left(\sqrt{\frac{۸\pi^{۲} d_{eff}^{۲} L_{cry}{}^{۲} h\phi}{n_w^{۲} n_{۲\square}{}^{۲} \lambda_w^{۲}}}\, sinC\left({\Delta k L_{cry}}/{۲}\right)\right) \quad (۱)$$

که در آن d_{eff} ضریب غیرخطی، $n_{۲\square}$ و n_w به ترتیب ضرایب شکست غیرعادی و عادی، λ_w طول‌موج اصلی، h ثابت پلانک، c سرعت نور، ϕ چگالی فوتون فرودی، L_{cry} طول بلور و Δk عدم تطبیق‌فازی است. برای محاسبه‌ی چگالی فوتون‌های فرودی بر روی بلورغیرخطی باید معادلات نرخ لیزر تپی همراه با تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی حل شود. معادلات (۲) و (۳) معادلات نرخ حاکم بر این لیزر را نشان می‌دهند[۱].

$$\frac{dN}{dt} = R_p - N\sigma c\Phi - \frac{N}{\tau} \quad (۲)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{۱}{t_{cavity}}\right)(۲\square\square l_{rod}(\phi + ۱) - ln(۱ - R)\phi - \alpha(t)\phi - ۲\square_{SHG}\phi) \quad (۳)$$

N وارونگی جمعیت، Φ چگالی فوتون در گردش درون مشدد، R_p نرخ دمش، σ سطح مقطع گسیل القایی، c سرعت نور، τ طول عمر تراز بالای لیزر، R ضریب بازتاب، $\alpha(t)$ مجموع اتلاف‌های درون مشددی نظیر جذب و پراکندگی و اتلاف مربوط به آکوستواپتیک، $t_{cavity} = \left(\frac{۲l_{cav}}{c}\right)$ زمان یک دور رفت و برگشت فوتون در مشدد، l_{cav} طول اپتیکی مشدد و جمله‌ی $e_{SHG}\phi$ مربوط به تولید

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

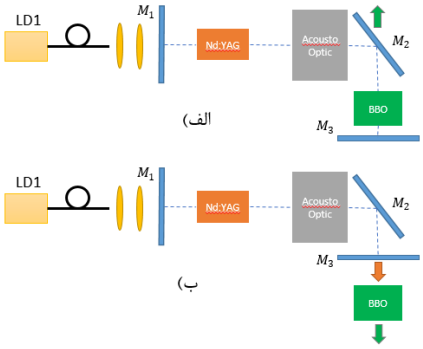
هماهنگ‌دوم داخل مشدد است. پس از حل معادلات نرخ توان خروجی متوسط را می‌توان از رابطه‌ی ۴ بدست آورد.

$$P_{ave} = \phi_{max} h\nu_{۵۳۲} cA\tau_{fwhm} T \qquad (۴)$$

که در آن ϕ_{max} چگالی فوتون در قله‌ی تپ خروجی هماهنگ‌دوم، $\nu_{۲}$ فرکانس هماهنگ‌دوم، A سطح مقطع باریکه‌ی خروجی، τ_{fwhm} پهنای تپ و T نرخ تکرار است.

طراحی چیدمان تجربی

شکل ۱ چیدمان تجربی مشدد لیزر طراحی شده را نشان می‌دهد. مشدد از سه آینه‌ی تخت تشکیل شده است که به صورت L شکل قرار گرفته‌اند. دو آینه‌ی $M_۱$ و $M_۲$ بازتابنده‌ی کامل و آینه‌ی $M_۳$ دارای بازتاب ٪۹۷ برای طول‌موج $۱۰۶۴nm$هستند. محیط بهره یک میله نئودمیوم‌یاگ با ابعاد ۲۰ × ۶ می‌باشد. سیستم دمش یک لیزر دیود فیبر کوپل با بیشترین توان خروجی $۲۰w$ در طول‌موج $۸۰۸nm$ است. خروجی لیزر دیود توسط یک سیستم تصویر کننده با دو عدسی به فواصل کانونی $۳,۵cm$ و $۲,۵cm$ به داخل محیط بهره با قطر $۸۰۰\mu m$ کانونی می‌شود و آن را به صورت طولی دمش می‌کند. آینه $M_۱$ در طول‌موج $۸۰۸nm$ ، ٪۹۰ عبور دارد. برای دستیابی به تپ‌های نانوثانیه، کلیدزنیQ با قرار دادن یک ماژول آکوستواپتیک(AOM) در داخل مشدد صورت می‌پذیرد. تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی، توسط قرار دادن یک بلور BBO با تطبیق‌فازی نوع یک و با زوایای برش $\theta = ۲۲.۵ , \phi = \pi/۲$، طول $۷mm$ و دارای پوشش ضد بازتاب، قبل از آینه $M_۲$ بدست می‌آید. تطبیق‌فاز بلور بحرانی و زاویه تطبیق‌فاز آن ۲۲.۵ درجه است. در این چیدمان آینه $M_۲$ دارای عبور کامل برای طول‌موج $۵۳۲nm$ و آینه $M_۳$ دارای بازتاب کامل برای طول‌موج $۵۳۲nm$ است. بدین ترتیب دو بار گذر از بلورغیرخطی حاصل می‌شود. برای تولید هماهنگ‌دوم خارج مشددی، بلور BBO بیرون از مشدد و بعد از آینه‌ی $M_۳$ قرار می‌گیرد. در این چیدمان ضریب بازتاب آینه $M_۳$ برای طول‌موج $۱۰۶۴nm$، ٪۹۷ است.



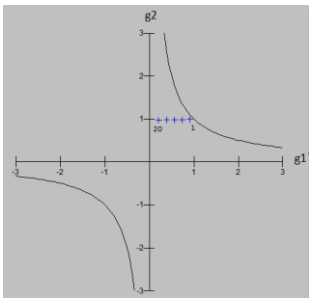
شکل ۱: شمایی از چیدمان مشدد لیزر نانوثانیه طراحی شده برای تولید هماهنگ‌دوم الف) داخل مشددی ب) خارج مشددی

برای طراحی مشدد و دستیابی به نواحی پایداری آن، ماتریس اپتیکی یکبار گذر از المان‌های مشدد محاسبه می‌شود و سپس پارامترهای پایداری مشدد $g_۱$ و $g_۲$ از رابطه‌های (۵) و (۶) بدست می‌آیند[۱]:

$$g_۱ = A - \frac{B}{R_۱} \qquad (۵)$$

$$g_۲ = D - \frac{B}{R_۲} \qquad (۶)$$

A، B، D به ترتیب درایه اول، دوم و چهارم ماتریس اپتیکی، $R_۱$ و $R_۲$ شعاع انحنای آینه‌ی ابتدا و انتهای لیزر است. مقدار فاصله کانونی عدسی حرارتی و پایداری چیدمان لیزر توسط نرم افزار لسکد مورد بررسی قرار گرفته است.

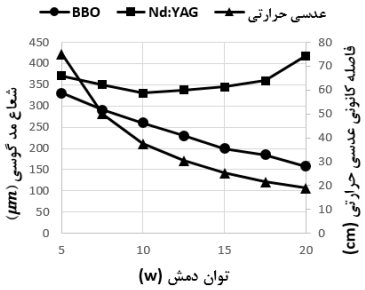


شکل ۲: نمودار تغییرات نقطه کار پایداری مشدد بهینه طراحی شده

برای دستیابی به طراحی بهینه مشدد، طول مشدد از ۱۸ تا $۳۰cm$ تغییر کرد و تاثیر آن بر روی نقطه کار مشدد در نمودار پایداری به ازای توان‌های دمش مختلف مشاهده شد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

نمودار تغییرات نقطه کار پایداری مشدد بهینه بر حسب تغییرات توان دمش به ازای طول $۱۸cm$ در شکل ۲ بدست آمده است. نتایج نشان می‌داد که مشدد به ازای طول‌های بلندتر در توان‌های بالا سریعا ناپایدار می‌شود. شکل ۳ تغییرات شعاع مد گوسی مشدد روی سطح محیط بهره و بلورغیرخطی و تغییرات فاصله کانونی عدسی حرارتی محاسبه شده برای طراحی بهینه مشدد را نشان می‌دهد. در توان‌های بالا شعاع مد گوسی روی سطح محیط بهره افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش بازده همپوشانی مشدد و کیفیت بالاتر باریکه خروجی می‌شود. از طرفی کم شدن شعاع مد گوسی بر روی سطح بلورغیرخطی نیز باعث افزایش توان لیزر سبز می‌گردد.



شکل ۳: نمودار تغییرات الف)فاصله کانونی عدسی حرارتی، ب)قطر مد گوسی بر روی محیط بهره ،ج) مد گوسی بر روی بلورغیرخطی

با حل معادلات نرخ (۲) و (۳) تغییرات توان خروجی متوسط برای هماهنگ‌دوم درون مشدد و خارج مشددی بر حسب توان‌های ورودی مختلف و به ازای نرخ تکرار $۲KHz$ و با شرط تطبیق‌فاز کامل محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که به ازای توان دمش $۲۰w$، توان خروجی متوسط برای تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی نزدیک به ۳۰ برابر حالت خارج مشددی است. نتایج تجربی بدست آمده از مشدد طراحی شده برای دو حالت تولید هماهنگ‌دوم درون مشددی و خارج مشددی در نرخ تکرار $۲KHz$ نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین توان خروجی متوسط برای تولید هماهنگ‌دوم درون مشددی برابر $۲۲۵mw$ و برای تولید هماهنگ‌دوم خارج مشددی برابر $۷٫۶mw$، به ازای توان دمش فرودی یکسان $۲۰w$ بدست آمد.



شکل ۴: نمودار تغییرات توان خروجی بر حسب توان ورودی برای تولید هماهنگ‌دوم داخل و خارج مشددی



شکل ۵: نمودار تغییرات توان خروجی هماهنگ‌دوم خارج مشددی(نمودار آبی رنگ)، هماهنگ‌دوم داخل مشددی (نمودار قرمز رنگ) بر حسب توان‌های ورودی مختلف

نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی و ساخت یک مشدد لیزر نئودمیوم یاگ تپی یک طرف دمش شده طولی با نرخ تکرار $۲KHz$ همراه با تولید هماهنگ‌دوم داخل و خارج مشددی به همراه مقایسه‌ی تئوری و تجربی توان خروجی هر چیدمان پرداخته شده است. حداکثر توان خروجی متوسط $۲۲۵mw$ برای هماهنگ‌دوم داخل مشددی و $۷٫۶mw$ برای هماهنگ خارج مشددی بدست آمد که نشان می‌دهد توان لیزر سبز در چیدمان تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی ۳۰ برابر بیشتر از چیدمان خارج مشددی است.

مرجع‌ها

[۱] Walter Koechner. “Solid-state laser engineering”, Springer, ۲۰۰۶.

[۲] Hamid Hemrnati , James R. Lesh, “A ۳٫۵ W output, diode-pumped, Q-switched ۵۳۲ nrn laser”, Optical Society of America, pp ۱۳۲۲-۱۳۲٤, ۱۹۹٤

[۳] Jianquan Yao, Yuye Wang . “Nonlinear Optics and Solid-State Lasers”, Springer, ۲۰۱۲

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]