



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 هماهنگ دوم داخل و خارج مشددی در لیزر نئودیمیوم 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.ms22@yahoo.com, a_arabnian@sbu.ac.ir, r-massudi@sbu.ac.ir

چکیده - تولید هماهنگ دوم (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 ارائه یک چیدمان برای تولید پربازده لیزر سبز تپی نانوثانیه توسط تولید هماهنگ دوم درون مشددی لیزر نئودیمیوم یاگ یک طرف دمش شده طولی، پرداخته می شود. 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 هماهنگ دوم خروجی از این چیدمان با چیدمان تولید هماهنگ دوم خارج مشددی پرداخته می شود. هر دو نتایج شبیه سازی و تجربی، افزایش ۳۰ برابری توان سبز خروجی از چیدمان هماهنگ دوم داخل مشددی را نسبت به خارج مشددی نشان می دهد.

کلید واژه- پایداری مشدد، تولید هماهنگ دوم 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.ms22@yahoo.com, a_arabnian@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 pump 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

مقدمه

امروزه لیزرهای حالت جامد تپی از مرتبه‌ی نانو ثانیه با نرخ تکرار بالا و در ناحیه طول موجی مرئی، کاربردهای گسترده-ای 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، بلور غیرخطی را در خروجی لیزر با طیف مادون قرمز قرار می‌دهند. برای افزایش بازده تبدیل، باریکه خروجی از لیزر بر روی بلور شدیداً کانونی می‌شود که احتمال آسیب به پوشش‌های روی بلور غیرخطی را افزایش می‌دهد. با قرار دادن بلور غیرخطی 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 در توان‌ها 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 نئودیمیوم یاگ یک‌طرف دمش شده-ی 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 2ω را تولید می‌کنند. بازده تبدیل این فرآیند از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۳]:

$$e_{SHG} = \tanh^2 \left(\sqrt{\frac{\pi^2 d_{eff}^2 L_{cry} h \phi}{n_w n_{\tau} \lambda_w}} \sin C \left(\Delta k L_{cry} / \tau \right) \right) \quad (1)$$

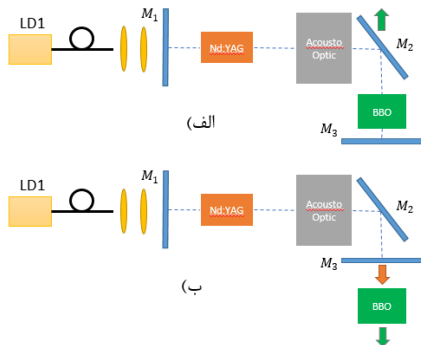
که در آن d_{eff} ضریب غیرخطی، n_w و n_{τ} به ترتیب ضرایب شکست غیرعادی و عادی، λ_w طول موج اصلی، h ثابت پلانک، c سرعت نور، ϕ چگالی فوتون فرودی، L_{cry} طول بلور و Δk عدم تطبیق فازی است. برای محاسبه‌ی چگالی فوتون‌های فرودی بر روی بلور غیرخطی باید معادلات نرخ لیزر تپی همراه با تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی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

$$\frac{dN}{dt} = R_p - N\sigma c\Phi - \frac{N}{\tau} \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{1}{t_{cavity}} \right) (\tau \square \square l_{rod}(\phi + 1) - \ln(1 - R)\phi - \alpha(t)\phi - \tau \square_{SHG}\phi) \quad (3)$$

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 آکوستو اپتیک، $t_{cavity} = \left(\frac{\tau l_{cav}}{c} \right)$ زمان یک دور رفت و برگشت فوتون در مشدد، l_{cav} طول اپتیکی مشدد و جمله‌ی $e_{SHG}\phi$ مربوط به تولید

این چیدمان ضریب بازتاب آینه M_3 برای طول موج 1064nm ، 97% است.



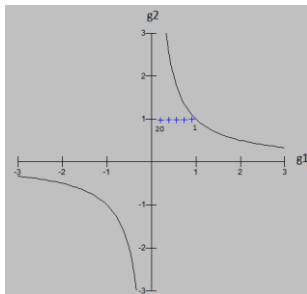
شکل ۱: شمایی از چیدمان مشدد لیزر نانوآئینه طراحی شده برای تولید هماهنگ دوم (الف) داخل مشددی (ب) خارج مشددی

برای طراحی مشدد و دستیابی به نواحی پایداری آن، ماتریس اپتیکی یکبار گذر از المانهای مشدد محاسبه می-شود و سپس پارامترهای پایداری مشدد g_1 و g_2 از رابطه-های (۵) و (۶) بدست می-آیند [۱]:

$$g_1 = A - \frac{B}{R_1} \quad (5)$$

$$g_2 = D - \frac{B}{R_2} \quad (6)$$

A ، B ، D به ترتیب درایه اول، دوم و چهارم ماتریس اپتیکی، R_1 و R_2 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 30cm تغییر کرد و تاثیر آن بر روی نقطه کار مشدد در نمودار پایداری به ازای توانهای دمش مختلف مشاهده شد.

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

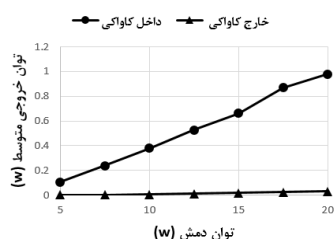
$$P_{ave} = \phi_{max} h\nu_{\omega_{2\omega}} c A \tau_{fwhm} T \quad (4)$$

که در آن ϕ_{max} چگالی فوتون در قله‌ی تپ خروجی هماهنگ دوم، ν_{ω} فرکانس هماهنگ دوم، A سطح مقطع باریکه‌ی خروجی، τ_{fwhm} پهنای تپ و T نرخ تکرار است.

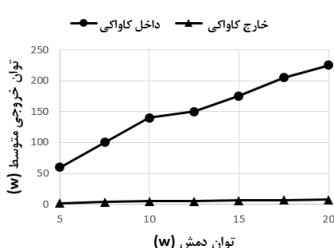
طراحی چیدمان تجربی

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_1 و M_2 بازتابنده-ی کامل و آینه‌ی M_3 دارای بازتاب 97% برای طول موج 1064nm هستند. محیط بهره یک میله نئودیمیوم-یاگ با ابعاد $20\text{mm} \times 6\text{mm}$ می‌باشد. سیستم دمش یک لیزر دیود فیبر کوپل با بیشترین توان خروجی 20W در طول موج 808nm است. خروجی لیزر دیود توسط یک سیستم تصویر کننده با دو عدسی به فواصل کانونی 3.5cm و 2.5cm به داخل محیط بهره با قطر $800\mu\text{m}$ کانونی می‌شود و آن را به صورت طولی دمش می‌کند. آینه M_1 در طول موج 808nm ، 90% عبور دارد. برای دستیابی به تپ‌های نانوآئینه، کلیدزنی Q با قرار دادن یک مازول آکوستوآپتیک (AOM) در داخل مشدد صورت می‌پذیرد. تولید هماهنگ دوم داخل مشددی، توسط قرار دادن یک بلور BBO با تطبیق فازی نوع یک و با زوایای برش $\phi = \pi/2$ ، $\theta = 22.5^\circ$ ، طول 7mm و دارای پوشش ضد بازتاب، قبل از آینه M_2 بدست می‌آید. تطبیق فاز بلور بحرانی و زاویه تطبیق فاز آن 22.5° درجه است. در این چیدمان آینه M_2 دارای عبور کامل برای طول موج 532nm و آینه M_3 دارای بازتاب کامل برای طول موج 532nm است. بدین ترتیب دو بار گذر از بلور غیرخطی حاصل می‌شود. برای تولید هماهنگ دوم خارج مشددی، بلور BBO بیرون از مشدد و بعد از آینه‌ی M_3 قرار می‌گیرد. در

مشددی برابر 7.6mw ، به ازای توان دمش فرودی یکسان 20W 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

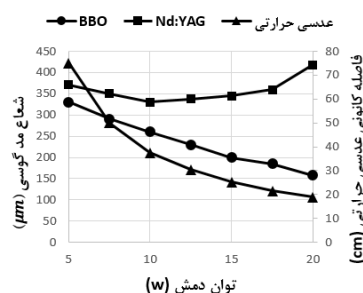
نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی و ساخت یک مشدد لیزر نئودیموم یاگ تپی یک طرف دمش شده طولی با نرخ تکرار 2KHz 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 225mw برای هماهنگ‌دوم داخل مشددی و 7.6mw برای هماهنگ خارج مشددی بدست آمد که نشان می‌دهد توان لیزر سبز در چیدمان تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی 30 برابر بیشتر از چیدمان خارج مشددی است.

مرجع‌ها

- [۱] Walter Koechner. "Solid-state laser engineering", Springer, ۲۰۰۶.
- [۲] Hamid Hemrnat, James R. Lesh, "A 2.5W output, diode-pumped, Q-switched 532nm laser", Optical Society of America, pp 1322-1324, ۱۹۹۴
- [۳] Jianquan Yao, Yuye Wang. "Nonlinear Optics and Solid-State Lasers", Springer, ۲۰۱۲

نمودار تغییرات نقطه کار پایداری مشدد بهینه بر حسب تغییرات توان دمش به ازای طول 18cm 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 بلور غیرخطی 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 بلور غیرخطی 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 بلور غیرخطی

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 2KHz و با شرط تطبیق فاز کامل محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که به ازای توان دمش 20W ، توان خروجی متوسط برای تولید هماهنگ‌دوم داخل مشددی نزدیک به 30 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 2KHz نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. بیشترین توان خروجی متوسط برای تولید هماهنگ‌دوم درون مشددی برابر 225mw و برای تولید هماهنگ‌دوم خارج