بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

تولید ۱,۳ وات لیزر سبز پیوسته ۵۳۲ نانومتر توسط تقویت تشدیدی غیر فعال در لیزر فیبری

حمید حقمرادی، آتوسا سادات عربانیان* و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران(*a_arabanian@sbu.ac.ir)

چکیده – در این مقاله با طراحی و ساخت یک لیزر فیبری پیوسته آلاییده به ایتربیوم در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و قرار دادن یک کاواک فابری پرو پاپیونی درون کاواک لیزر فیبری، توان گردشی داخل کاواک لیزر به روش جفت سازی غیر فعال از مقدار ۵,۱ وات در کاواک اصلی به مقدار ۵۲ وات در داخل کاواک فابری پرو افزایش یافته است که تقویت ده برابری هماهنگ اصلی را به همراه دارد. با قرار دادن یک بلور LBO در داخل این کاواک تقویت تشدیدی، بازده تولید هماهنگ دوم نور لیزر پیوسته از ۰,۰۵۱ درصد به ۲۵ درصد افزایش یافته است و توان خروجی ۱,۳ وات نور هماهنگ دوم در طول موج ۵۳۲ نانومتر حاصل شده است، بنابراین بازدهی تولید هماهنگ دوم نور پیوسته بلور LBO به واسطه کاواک تقویت، به اندازه ۴۸۶ برابر افزایش یافته است.

کلید واژه- کاواک تقویت تشدیدی، تولید هماهنگ دوم، کاواک فابری پرو پاپیونی

Generation of 1.3 W continuous green laser at 532 nm by passive resonant enhancement technique in a fiber laser

Hamid Haghmoradi, Atoosa Sadat Arabanian* and Reza Massudi

Laser and plasma research institute of Shahid Beheshti university,Tehran,Iran (a_arabanian@sbu.ac.ir *)

Abstract- In this paper design and fabrication of an Yb-doped fiber laser at 1064nm along with a Fabry-Perot bow tie cavity inside the fiber laser cavity is presented. The circulating power inside the laser cavity is enhanced by the intracavity passive locking technique from 5.1W in the main cavity to 52W in the Fabry-Perot cavity. By placing an LBO crystal within this resonant enhancement cavity, efficiency of the second harmonic of laser in continuous regime is increased from 0.05% to 25% that result to 1.3W light at 532nm. Thus, the efficiency of the second harmonic generation of continuous light in the LBO crystal is increased about 486 times.

Keywords: Resonant enhancement cavity, second harmonic generation, bow tie Fabry-Perot cavity

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

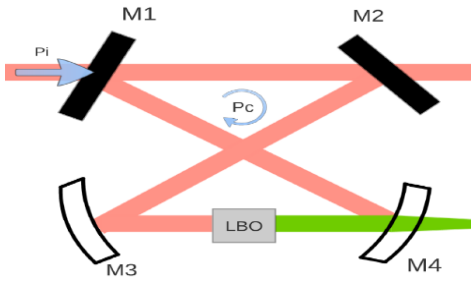
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

مقدمه

لیزر های پیوسته توان بالا در ناحیه طول موج مرئی کاربرد های فراوانی در زمینه های ارتباطات زیر دریا[1]، فلوسیتومتری[1] [2]، تصویر برداری پزشکی[3] و دمش اپتیکی دارد[4]. اما تا به امروز چشمه های محدودی برای دستیابی مستقیم به لیزر های در این ناحیه طول موجی گزارش شده است. روش معمول برای دستیابی به نور لیزر در این ناحیه طول موجی، تولید هماهنگ دوم از باریکه لیزر در ناحیه مادون قرمز نزدیک می‌باشد. در سال ۱۹۶۶ اشکین[2] و همکارانش [5] برای اولین بار از یک لیزر هلیوم-نئون و جفت سازی آن با یک کاواک تشدیدگر که درون آن بلور KDP قرار داشت، برای تقویت تشدیدی تولید هماهنگ دوم استفاده کردند در سال ۱۹۹۱ یانگ[3] به همراه همکارانش در دانشگاه استنفورد[6] موفق به تولید نور سبز با طول موج ۵۳۲ نانومتر از هماهنگ دوم لیزر پیوسته Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و با توان ۱۸ وات توسط قفل سازی فعال کاواک تقویت خارجی شدند و به بازده هماهنگ دوم ۳۶ درصدی و توان نور سبز ۶,۵ وات دست پیدا کردند. اما کاواک های تقویت تشدیدی خارجی نیازمند قفل سازی پیچیده الکترونیکی به کاواک اصلی لیزر، و در پی آن یک لیزر فیبری با پهنای فرکانسی بسیار باریک در بازه‌ی 1KHz~30MHz می‌باشند[7]. برای غلبه بر محدودیت های موجود در روش قفل سازی فعال، رافال سیسلاک[4] و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به وسیله رویکردی هوشمندانه با قرار دادن یک کاواک تشدیدی هماهنگ دوم فضای آزاد پاپیونی در داخل کاواک لیزر فیبری با فیبر دو غلافه نگه دارنده قطبش، برای اولین بار قفل سازی غیر فعال این دو کاواک با یکدیگر را انجام دادند[8] در ادامه در سال ۲۰۱۸ از همین روش با استفاده از تابش ۹۰۰ نانومتر فیبر عادی دوغلافه آلاییده به نئودیوم برای دستیابی به طول موج ۴۵۰ نانومتر استفاده شد[9]. در این مقاله به وسیله روش داخل کاواکی و با استفاده از فیبر آلاییده به ایتربیوم ۲۰/۴۰۰، توان لیزر فیبری پیوسته در کاواک تقویت تشدید شده است و در پی آن بازدهی تولید هماهنگ دوم برای دست یابی به نور لیزر ۵۳۲ نانومتر در توان های بالا افزایش یافته است.

مبانی نظری

برای تشدید توان لیزر می‌توان از جفت سازی فعال یا غیر فعال کاواک های تقویت در داخل یا خارج کاواک لیزر استفاده کرد. کاواک های تقویت تشدیدی بر اساس برهمنهی تشدیدی امواج الکترومغناطیسی به دام افتاده در داخل آنها کار می‌کنند. در شکل ۱ نمونه ای از این نوع



شکل ۱- کاواک تقویت تشدیدی با هندسه پاپیونی

کاواک ها با هندسه پاپیونی مشاهده می‌شود. با محاسبه برهمنهی میدان الکترومعناطیسی در داخل کاواک، توان تشدیدی (گردشی) آن به صورت رابطه‌ی زیر نوشته می‌شود[10]:

$$P_c = \frac{P_i(1-r_1^2)}{(1-r_1 r_2 r_{HR}^2\sqrt{(1-\alpha)(1-\gamma_{SHG}P_c)}\,)^2} \qquad (۱)$$

در این رابطه P_c توان گردشی، r_1 و r_2 به ترتیب ضرایب بازتاب آینه های M_2 و M_1، α مجموع تلفات داخل کاواکی،

---

[1] flowcytometry
[2] Ashkin
[3] Yang
[4] Rafal Cieslak

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

r_{HR} ضریب بازتاب آینه های M_3 و M_4 و γ_{SHG} بازده تبدیل تک بار گذر بلور LBO می‌باشد. با حل معادله بالا برای P_c به ازای توان های ورودی مختلف، توان تقویت شده‌ی تشدیدی در داخل کاواک محاسبه می‌شود. بیشترین مقدار توان گردشی زمانی حاصل می‌شود که مقدار عبور آینه جفتگر ورودی کاواک با مجموع تلفات داخل آن برابری کند یعنی:

$$r_1 = r_2 r_{HR}^2 \sqrt{(1-\alpha)(1-\gamma_{SHG}P_C)} \quad (۲)$$

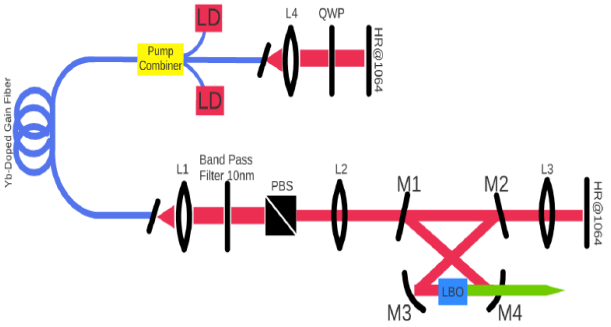
در این حالت توان ورودی به بیشترین مقدار تقویت خود که برابر

$$P_c = \frac{P_i}{T_1} \quad (۳)$$

است میرسد که در اینجا $T_1 = 1 - r_1^2$ میزان درصد عبور آینه جفتگر ورودی می‌باشد.

چیدمان تجربی تولید هماهنگ دوم تشدیدی

طراحی چیدمان تجربی تقویت تشدیدی تولید هماهنگ دوم طراحی شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. کاواک اصلی لیزر فیبری توسط دو آینه با بازتابندگی بالا در طول موج ۱۰۶۴نانومتر تشکیل شده است. محیط بهره با فیبر دوغلافه آلاییده به ایتربیوم با قطر غلاف/ هسته ی ۲۰/۴۰۰ و به طول ۲۰ متر است که برای اطمینان از کارکرد بهینه در مد اصلی به دور پیچه ای با شعاع ۶ سانتی متر پیچیده شده است. شعاع بهینه برای پیچه با هدف ایجاد تلفات حد اکثری برای مد های مراتب بالاتر و تلفات حداقلی برای مد اصلی توسط نرم افزار Lumerical شبیه سازی شده است. میتوان ثابت کرد که حداقل طول کاواک لیزر فیبری برای



شکل ۲- آرایه طرح وار چیدمان تولید هماهنگ دوم

اطمینان از عملکرد پایدار کاواک تقویت درون کاواک لیزر از رابطه (۴) پیروی می‌کند[10]:

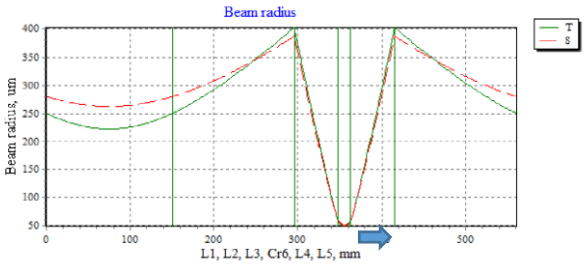
$$L_{min} = Fd \quad (۴)$$

در رابطه بالا L_{min} حداقل طول کاواک لیزر فیبری، F فاکتور ظرافت کاواک تقویت و d طول آن است. طول ۲۰ متری کاواک لیزر فیبری امکان عملکرد پایدار در کاواک های با فاکتور ظرافت بالا را نیز فراهم خواهد کرد. دو لیزر دیود با توان خروجی حد اکثر ۳۵ وات در طول موج ۹۷۶ نانومتر مسئولیت دمش محیط بهره را بر عهده دارند. دو سر خروجی فیبر در زاویه ۸ درجه برای جلوگیری از بازخورد بازتاب ۴ درصدی از سطح فیبر برش داده شده است از آنجایی که فیبر برای نگه داشتن قطبش نور طراحی نشده است یک تیغه ربع موج و یک شکافنده قطبش داخل کاواک قرار داده شده است تا به طور نسبی تخریب قطبش را در داخل فیبر جبران کند و حالت قطبش باریکه را بر روی محور عادی بلور LBO تنظیم کند. کاواک تقویت داخلی با هندسه پاپیونی شامل دو آینه تخت M1 و M2 با ضرایب عبور به ترتیب ۴ و ۱,۵ درصد به فاصله ۱۵۰ میلی متر هستند و دو آینه کروی M3 و M4 با ضریب بازتاب ۹۹,۸ درصد در ۱۰۶۴ نانومتر و ضریب عبور بالای ۹۵ درصد در ۵۳۲ نانومتر، با شعاع انحنای ۱۰۰ میلی متر مسئول کانونی کردن باریکه بر روی بلور LBO هستند. هندسه کاواک خاصیت عملکرد تبدیل تک راستا و همچنین عدم بازخورد از آینه های M1 و M2 به داخل لیزر فیبری را دارا می‌باشد. دو لنز L2 و L3 جهت تطبیق مد عرضی استفاده شده است تا بهترین تطبیق فضایی ممکن بین مدهای عرضی TEM00 کاواک لیزر فیبری با کاواک تقویت حاصل شود. بلور LBO نوع یک با برش ۹۰ درجه و دو سطح تخت با پوشش ضد بازتاب و خاصیت تطبیق فازی غیر بحرانی به طول ۱۵ میلی متر درست در وسط آینه های M3 و M4 قرار دارد. معادلات ماتریس انتشار ABCD برای کاواک تقویت با در نظر گرفتن محدودیت تجربی زاویه برخورد آینه

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

ها و با شرط عملکرد پایدار کاواک در میانه محدوده پایداری ($\frac{A+D}{2}=0$) در مد اصلی TEM00 جهت تعیین پایداری این مد کاواک حل شده اند . در نمودار شکل ۳ تغییرات شعاع باریکه مد اصلی را در داخل کاواک تقویت نشان می‌دهد به طوریکه در وسط دو آینه تخت طول شعاع باریکه در صفحه مماسی ۲۲۳ میکرون و در صفحه عمودی ۲۶۳ میکرون محاسبه شده است. همچنین اندازه مد در داخل بلور LBO با برش سطوح تخت و ضریب شکست ۱,۶ در صفحه مماسی Wt= ۴۸,۴۸ میکرون و در صفحه عمودی Ws =۵۰,۴۶ محاسبه شده است. نسبت Wt / Ws را معیاری برای سنجش آستیگماتیسم در داخل بلور بوده و برابر $\frac{Wt}{Ws}=$ ۹۶% می‌باشد که نشان دهنده آن است که

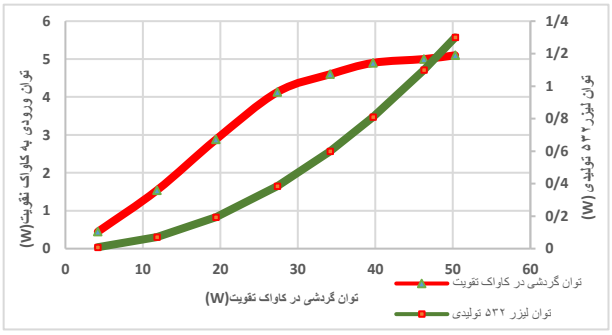


شکل ۳- شعاع پرتو در داخل کاواک. سمت راست-شعاع باریکه در طول بلور

آستیگماتیسم تا حد بسیار خوبی در میان بلور جبران شده است. دمای بلور LBO در گرم کن با توزیع یکنواخت، در دمای تطبیق فازی یعنی ۱۴۸ درجه سانتیگراد برای طول موج۱۰۶۴ نانومتر تنظیم شده است.

نتایج تجربی

با اندازه گیری توان فرودی به آینه M1 و توان بازتابی از آن توان ورودی به کاواک تقویت را می‌توان اندازه گیری کرد. برای این منظور یک جدا کننده باریکه با بازتاب کم قبل از آینه M1 قرار داده شده است. در نمودار شکل ۴ میزان توان گردشی در کاواک تقویت به ازای توان ورودی به آن، و همچنین میزان توان نور ۵۳۲ نانومتر تولیدی نسبت به این توان تقویت شده نشان داده شده است. با توجه به شکل با ورود ۵,۱ وات نور ۱۰۶۴ نانومتر به داخل کاواک تقویت و



شکل ۴-نمودار توان هماهنگ دوم و نوان هماهنگ اصلی به ازای توان های ورودی به کاواک تقویت

تشدید آن به اندازه ۵۲ وات ضریب تقویت تقریبا ۱۰ برابر است. بازده تک بار گذر بلور LBO به ازای شعاع ۵۰ میکرونی باریکه در وسط بلور، ۰,۰۵۱۴ درصد محاسبه شده است اما با قرار دادن بلور LBO در تحت شرایط تطبیق فازی در کاواک تقویت تشدیدی ما حصل این تقویت توان، تولید ۱,۳ وات نور هماهنگ دوم خالص در طول موج ۵۳۲ نانومتر است که بازدهی ۲۵ درصدی را به همراه دارد. با توجه به بستگی بازدهی تولید هماهنگ دوم به توان افزایش بازدهی به اندازه ۴۸۶,۴ برابر رخ داده است که مقدار چشمگیری از افزایش بازدهی محسوب می‌شود.

نتیجه گیری

در این مقاله با طراحی و ساخت لیزر فیبری ۱۰۶۴ نانومتر و همچنین طراحی و ساخت کاواک تقویت تشدیدی، توان محدود لیزر در داخل کاواک لیزر فیبری تا ۵۲ وات در داخل کاواک تقویت تشدید شده است که این امر باعث افزایش ۴۸۶ برابری بازدهی تک بار گذر بلور LBO شده است و ۱,۳ وات توان لیزر در طول موج ۵۳۲ نانومتر استخراج شده است.

مرجع‌ها

[1] . J. Baghdady, K. Miller, K. Morgan, M. Byrd, S. Osler, R. Ragusa, W. Li, B. M. Cochenour, and E. G. Johnson, Opt. Express 24(9), 9794–9805 (2016).
[2] 2. W. G. Telford, T. Hawley, F. Subach, V. Verkhusha, and R. G. Hawley Methods 57(3), 318–330 (2012).
[3] 3. H. Sparks, S. Warren, J. Guedes, N. Yoshida, T. C. Charn, N. Guerra, T. Tatla, C. Dunsby, and P. French, J. Biophotonics 8(1-2), 168–178 (2015).
[4] 4. N.-O. Hansen, A.-R. Bellancourt, U. Weichmann, and G. Huber, Appl. Opt. 49(20), 3864–3868(2010).
[5] G. D. Boyd, A. Ashkin, J. M. Dziedzic, and D. A. Kleinman, *Phys. Rev.*, vol. 137, no. 4A, 1965.
[6] S. T. Yang *et al.*, *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 1493, pp. 5–532,
[7] M. Stappel, R. Steinborn, D. Kolbe, and J. Walz, *Laser Phys.*, vol. 23, no. 7, pp. 3866–3871, 2013.
[8] R. Cieslak and W. a Clarkson, *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 10, pp. 1896–1898, 2011.
[9] B. Cadier, H. Gilles, M. Laroche, T. Robin, and B. Leconte, *Opt. Express*, vol. 26, no. 8, p. 10000, 2018.
[10] R. Cieslak, “Power scaling of novel fibre sources,” 2012.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]