

بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونی ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونی ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران. ۱۴۰۰ بهمن ۱۴۰۰



افزایش گسترهٔ کوک پذیری تقویت کننده پارامتری تراهرتز مبتنی بر فرآیند غیرخطی ترکیب چهار موج در TOPAS

طاهره امینی، فاضل جهانگیری

F_jahangiri@sbu.ac.ir

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده – در این مقاله، تقویت کنندهٔ پارامتری تراهرتز با گسترهٔ کوکپذیری بالا و مبتنی بر فرآیند ترکیب چهار مـوج در TOPAS مورد بررسی قرار گرفته است. این تقویت کننده که با موج تراهرتز با توان قله ۲ وات بذردهی شده است، تحت پمپاژ اپتیکی مناسب میتواند تراهرتز تقویت شدهای تولید کند که فرکانس مرکزی آن در گسترهٔ ۲/۷ تا ۱۴/۶ تراهرتز کوکپذیر است. نتایج نشان مـی-دهد که بازده تقویت به ازای یکبار رفت و برگشت داخل کاواک و در بهترین شرایط تطبیق فاز یعنی در ۹/۶ تراهرتز برابر بـا ۱۰۴۹ است که منجر به تولید موج تراهرتز با بیشینه توان ۳ ۲/۰۹۸ میشود.

كليد واژه- تراهرتز، تركيب چهار موج، توپاز، غيرخطی، OPA ، OPA.

Improving the tunability range of terahertz parametric amplifier based on nonlinear four wave mixing process in TOPAS

Tahereh Amini, Fazel Jahangiri

F_jahangiri@sbu.ac.ir

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University

Abstract- In this paper, a terahertz parametric amplifier with high tuning range based on the four-wave mixing process in TOPAS is investigated. Terahertz seed with peak power of 2W, under suitable optical pumping can produce amplified wave with central frequency in the range of 4.7- 14.6THz. The results show that the amplification efficiency for one round trip inside the cavity and in the best phase matching condition, at of 9.6 THz is 1.049, which leads to the generation of terahertz wave with peak power of 2.098W.

Keywords: FWM, Nonlinearity, OPA, OPO, Terahertz, THz, TOPAS.

مقدمه

در بین روشهای متفاوتی که برای تولید موج تراهرتز وجود دارد، نوسانگرها (OPO) و تقویت کنندههای (OPA) پارامتری به عنوان یک فناوری مناسب و با قابلیت انعطاف بسیار بالا برای تولید امواج کوکپذیر با باند وسيع و يرتوان تراهرتز مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. اصلی ترین بخش در طراحی تقویت کنندههای یارامتری، در نظر گرفتن مواد اپتیک غیرخطی مرتبهٔ دوم و سوم با شرايط مورد نياز است. مواد غيرخطي مرتبة دوم مي بايست از بین موادی انتخاب شود که تقارن مرکزی نداشته باشند. از سوی دیگر، این مواد عمدتا دارای جذب بالایی در ناحیهٔ طیفی تراهرتز هستند. این در حالی است که انتخاب ماده در دسته مواد دارای غیرخطی مرتبهٔ سوم با چنین محدودیتهایی روبرو نیست. همچنین، به دلیل انعطافپذیری بیشتر روابط تطابق فاز (PhM) در مواد غيرخطى مرتبة سوم، انتخاب طول موجهاى ورودى مورد نیاز برای تولید تراهرتز بهینه، آسانتر است. استفاده از نوسانگرهای پارامتری مبتنی بر ترکیب چهار موج^۳ (FWM) برای تولید موج تراهرتز اولین بار در سال ۲۰۰۶ و با استفاده از یک فیبر نوری به عنوان محیط بهره معرفی شد [۲]. همچنین در سال ۲۰۱۲ استفاده از فیبر بلور فوتونی در نوسانگرهای پارامتری برای تولید موج تراهرتز پشنهاد شد [۳]. در سال ۲۰۲۰، نوسانگر پارامتری تراهرتز در ماده غیرخطی سیلیکون نیترید مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. همچنین، نشان داده شده است که استفاده از یک محیط بهره هیبریدی متشکل از توپاز و یک لایهٔ گرافن اکساید که به صورت چند پمپی تحریک میشود،

[']Optical Parametric Oscillator [']Optical Parametric Amplifier [']Four Wave Mixing

می تواند برای تقویت پارامتری باز تولیدی موج تراهر تز مورد استفاده قرار گیرد [۵].

در این مقاله، یک تقویت کننده پارامتری تراهرتز بر مبنای ترکیب چهارموج مورد بررسی قرار گرفته است. توپاز که دارای خواص اپتیکی مناسبی در ناحیهٔ تراهرتز است [۶]، به عنوان مادهٔ غیرخطی مرتبهٔ سوم مورد استفاده قرار گرفته است. به همین منظور، ضریب کر (n) این ماده در ناحیهٔ فرکانسی پمپ و تراهرتز به ترتیب برابر با ^{۲۰}-۱۰ × ۲ ناحیهٔ فرکانسی پمپ و تراهرتز به ترتیب برابر با تاین ماده در این، شرایط N⁻¹، بازه کوکپذیری فرکانس تراهرتز این، شرایط کاله، بازه کوکپذیری فرکانس تراهرتز تشدید، بررسی و خروجی تراهرتز بهینه به دست آمده است.

شماتیکی از هندسه برهمکنش در شکل (۱) نشان داده شده است. یک پالس لیزری فوق کوتاه پر شدت به عنوان پمپ در فرکانس w_p به درون کاواک هدایت میشود. یک موج تراهرتز ضعیف به عنوان بذر در فرکانس w_t همزمان با پمپ وارد کاواک میشود. انرژی پمپ به طور همزمان به سیگنال با فرکانس w_s و موج تراهرتز تقویت شده، بر مبنای اصول ترکیب چهار موج تبدیل میشود.



شکل ۱: شماتیک کلی از کاواک فابری پرو در فرآیند پارامتری

بخش ١: تطبيق فاز و بهره

تطبیق فاری در فرآیند ترکیب چهار موج، مبتنی بر اصول NLO مرتبهٔ سوم، به صورت زیر نوشته می شود: $\Delta k = \Delta k_{NL} + \Delta k_L = \Upsilon P (\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p)$ $+\beta_s + \beta_{THz} - {}^{\mathsf{T}}\beta_n$ ()

-۱/۵۴ تغییر دهیم، میتوانیم موج تراهرتز با گسترهٔ فرکانسی۴/۶ THz را با این چیدمان تقویت کرد.



شكل ٢: تغييرات بهرهٔ فرآيند بر حسب طول پمپ.

بخش دوم: طراحی چیدمان

مطابق با شکل(۱)، یک لیزر فمتوثانیه و یک پالس تراهرتز به ترتیب با طول موجهای ۱۵۶۰ nm و ۱۵۶۰ و μμ ۲۱/۳ در ورودی کاواک داریم. انتهای سمت راست کاواک را با نقره یا طلا یا آلومینیوم به گونهای لایه نشانی میکنیم که خروج پمپ از روزنهای در ابعاد طول موج پمپ صورت گیرد تا از بازتاب مجدد پمپ تضعیف شده به درون کاواک و به هم خوردن PhM جلوگیری کند و تنها موج تراهرتز را بازتاب دهد. برای بهینه کردن خروجی تراهرتز با توجه به شکل(۴)، در بازتابش ۱٪ بیشینه انرژی درون کاواک را داریم اما توان خروجی بزرگتر در بازتابش کمتر رخ می-دهد. از اینرو، انتهای سمت چپ کاواک با لایهٔ ناز کی از Ti یا NiCr لایه نشانی میشود. طول کاواک،مسیر پالس-های ورودی و لایهنشانیهابه گونهای انتخاب شدهاند که در شرایط آزمایشگاهی قابل حصول باشند.



شکل ۳: تغییرات انرژی THz درون کاواک و توان THz خروجی از کاواک بر حسب بازتابش آینههای کاواک

PhM که $\Delta k_{NL} = r P(\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p)$ که است و γ_{ij} است و (I , j= s, p , t) است و است و مدولاسیون فازی و γ_i مدولاسیون فازی متقاطع و P پیک $\Delta k_L =$ (۱) توانی لیزر پمپ است. بخش خطی رابطهٔ (۱ ω_i است که β_i عدد موج در فرکانس $\beta_s + \beta_t - r\beta_p$ است. به دلیل تبهگن بودن OPO ، فرکانس امواج تراهرتز و سیگنال دارای فاصلهٔ یکسانی با فرکانس پمپ هستند به . $\Delta k_L = \beta_{\gamma p} \Omega_{sp}^{\gamma} + \gamma \sum_{m=\gamma}^{\infty} \frac{\beta_{\gamma 00}}{(\gamma m)!} \Omega_{sp}^{\gamma m}$ پس، $eta_{\mathrm{T}\,p}$ و $\Omega_{sp}=\omega_s-\omega_p=\omega_p-\omega_t$ گونهای که پاشندگی سرعت گروه و eta_{mp} پاشندگیهای مراتب زوج بالاتر در فرکانس پمپ هستند. برای رسیدن به Δk صفر، باید ویژگیهای پرتو و پیک توانی در جملهٔ Δk_{NL} را بررسی کنیم. در $ar{A}_{eff}$, $\gamma(\omega)=rac{\omega n_{
m v}(\omega)}{car{A}_{eff}}$, Δk_{NL} و مقطع موثر مدی است که در یک موج گوسی برابر با است که w. j قطر کمر پرتوی j است. برای داشتن πw . jبهترین PhM، طولموج پمپ و تراهرتز و سیگنال به ترتیب ۱۵۶۰ nm و ۳۱/۲ μm و ۸۰۰ انتخاب شدهاند. $\Delta k_L = \cdot/\cdot \cdot \cdot \cdot \cdot / \mu m$ و $\Omega_{sp} = \cdot \cdot \cdot \cdot / \rho$ THz پس، $\Omega_{sp} = \cdot \rho$ [۵] ، می شود. اگر کمر پرتو پمپ را به اندازهٔ طول موج آن $\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p = - \cdot / \Upsilon$ ۹۰۸۷ ۱/Wm متمرکز کنیم، می شود. برای ایجاد بهترین PhM پیک توانی لیزر W ۱۴۹۵۵ انتخاب شده است. بنابراین،//um انتخاب $L_c = \frac{\pi}{\Lambda k} = 4 \Lambda \pi \cdot \mu m$ كه معادل طول همدوسى $\Delta k = \Delta k$ است. برای آنکه در یک رفت و برگشت کامل همدوسی حفظ شود طول محیط برهم کنش ۲۴۰۰ µm انتخاب شده است. بهرهٔ تقویت به صورت زیر تعریف می شود:

 $G = \frac{P_t(L)}{P_t(\cdot)} = 1 + \left[\frac{\gamma P}{g}\sinh(gl)\right]^{\gamma}$

که $\left[{}^{7}\left(\gamma P \right)^{r} - \left({\Delta k \over r} \right)^{r} \right] \right]$ است. مطابق با شکل(۳) که $\left[{}^{7}\left(\gamma P \right)^{r} - \left({\Delta k \over r} \right)^{r} \right] \right]$ بیشینه بهره در طول موج µm بمی الدر گسترهٔ ۸۵۸ است. اگر طول موج پمپ را در گسترهٔ Δk + ۰

گسترهٔ ۲Hz ۱۴/۶ - ۴/۷ تقویت کرد. شکل ۶، قلهٔ توان خروجی موج تراهرتز را در بازهٔ کوکپذیری نشان میدهد.

نتيجهگيرى

OPO، مبتنی بر FWM در کاواک حاوی توپاز، برای تقویت موج تراهرتز با گسترهٔ کوکپذیری بالا ارائه شده است. شرایط بهینه بررسی شده است و حاصل این بررسیها تقویت موج تراهرتز در گسترهٔ ۲Hz /۱۴/۶ – ۴/۷ است. در یک رفت و برگشت درون کاواک، بیشینه توان موج تراهرتز مربوط به فرکانس THz /۹ با قلهٔ توانی W موج تراهرتز مربوط به فرکانس ۲Hz /۹ با قلهٔ توانی و موج تراهرتز مربوا به فرکانس ۲۰۲۲ است. بازده کلی و تقویت به ترتیب ۲/۰۱۴ و ۱/۰۴۹ است.

مرجعها

- [1] Y.Takidaa, K.Nawata, and H.Minamide, "Injection-seeded backward terahertz-wave parametric oscillator," *APL Photonics*, vol. 5, 2020.
- [2] K. Suizu, Y. Suzuki, Y. Sasaki, H. Ito, and Y. Avetisyan, "Surface-emitted terahertz-wave generation by ridged periodically poled lithium niobate and enhancement by mixing of two terahertz waves," *Opt. Lett*, vol. 31, no. 7, p. 957–969, 7...9.
- [3] S. Li, H.Liu, N.Huang, Q.ibing Sun, and X. Li, "High efficiency terahertz-wave photonic crystal fiber," *APPLIED OPTICS*, vol. 51, no. 22, pp. ΔΔΥ٩-ΔΔΛϜ, Υ· ۱Υ.
- [4] T. Amini, F. Jahangiri, "Optimized design for a terahertz parametric oscillator based on degenerate four- wave mixing in silicon nitride," *JOSA B*, vol. τν, ΔΩ. ٩, ΔΩ. τντδ-τντ1, τ·τ·.
- [5] T.Amini and F.Jahangiri, "Regenerative terahertz wave parametric amplifier based on four-wave mixing in asynchronously pumped graphene oxide integrated TOPAS," *Optics Express*, vol. 29, no. τ1, ΠΠ. ٣٣. Δ٣-٣٣. ۶۶, ۲. τ1.
- [6] F. D'Angelo, Z. Mics, M. Bonn, and D. Turchinovich, "Ultra-broadband THz time-domain spectroscopy of common polymers using THz air photonics," *Opt. Express*, vol. 20, no. 10, p. 12475– 17۴ΛΔ, Υ· ١۴.

بخش سوم : نتایج و بحث

برای توصیف OPO از معادلات موج کوپلشده تحت تخمین سیگنال کوچک و تقریب دامنهٔ کندتغییر در مرجع [۵] استفاده شده است. تحول زمانی امواج طی فرآیند FWM، با بذر ورودی تراهرتز W ۲ بررسی میشود. مطابق با شکل ۵، طی فرآیند موج تراهرتز در حضور پمپ شروع به رشد می کند تا به یک حالت پایدار برسد. در فرکانس به رشد می ۲/۰ توان موج تراهرتز تولید شده W ۲/۰۲۸ است.



شکل ۴ دینامیک تحول امواج در فرآیند FWM در OPO.

در این فرآیند، سیگنال بسیار ضعیفی نیز تولید می شود. بازده کلی تبدیل پمپ به THz تقویت شده با توجه به رابطهٔ $\frac{P_{THz}^{out}}{P_{mump}^{in}}$ قلهٔ توان ورودی پمپ است. در این چیدمان، بازده کلی ۲۰۱۴,۰۰٪ و بازده تقویت THz $\eta_T = \frac{P_{THz}^{out}}{P_{ITHz}^{in}}$ THz بازده تقویت THz بازده تقویت LHz می آید.



شکل ۵: قلهٔ توانی THz خروجی در یک رفت و برگشت

با تغییر طول موج پمپ در گسترهٔ μm ۱٬۵۴–۱٬۵۴ و ثابت نگه داشتن قلهٔ توانی آن میتوانیم بذر ورودی را در