بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونی ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونی ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ 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 موج 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 ۴/۷ تا ۱۴/۶ تراهرتز کوک‌پذیر است. نتایج نشان می‌دهد که بازده تقویت به ازای یکبار رفت و برگشت داخل کاواک و در بهترین شرایط تطبیق فاز یعنی در ۹/۶ تراهرتز برابر با ۱/۰۴۹ است که منجر به تولید موج تراهرتز با بیشینه توان ۲/۰۹۸ W می‌شود.

کلید واژه- تراهرتز، ترکیب چهار موج، توپاز، غیرخطی، OPA ، OPO، THz.

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.

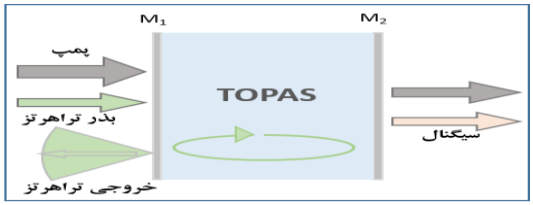
[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

مقدمه

در بین روش‌های متفاوتی که برای تولید موج تراهرتز وجود دارد، نوسانگرها (OPO[1]) و تقویت کننده‌های (OPA[2]) پارامتری به عنوان یک فناوری مناسب و با قابلیت انعطاف بسیار بالا برای تولید امواج کوک‌پذیر با باند وسیع و پرتوان تراهرتز مورد توجه قرار گرفته اند [۱]. اصلی ترین بخش در طراحی تقویت کننده‌های پارامتری، در نظر گرفتن مواد اپتیک غیرخطی مرتبهٔ دوم و سوم با شرایط مورد نیاز است. مواد غیرخطی مرتبهٔ دوم می‌بایست 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 غیرخطی مرتبهٔ سوم، انتخاب طول موج‌های ورودی مورد نیاز برای تولید تراهرتز بهینه، آسانتر است. استفاده از نوسانگرهای پارامتری مبتنی بر ترکیب چهار موج[3] (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، می‌تواند برای تقویت پارامتری بازتولیدی موج تراهرتز 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_2) این ماده در ناحیهٔ فرکانسی پمپ و تراهرتز به ترتیب برابر با ۲×۱۰^{-۲۰} m^2W^{-1} و ۱×۱۰^{-۲۰} m^2W^{-1} لحاظ شده است [۷]. علاوه بر این، شرایط PhM، بازه کوک‌پذیری فرکانس تراهرتز خروجی و طول مناسب کاواک برای داشتن بهترین شرایط 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 ω_p به درون کاواک هدایت می‌شود. یک موج تراهرتز ضعیف به عنوان بذر در فرکانس ω_t همزمان با پمپ وارد کاواک می‌شود. انرژی پمپ به طور همزمان به سیگنال با فرکانس ω_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 ۱: تطبیق فاز و بهره

تطبیق فاری در فرآیند ترکیب چهار موج، مبتنی بر اصول NLO مرتبهٔ سوم، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta k = \Delta k_{NL} + \Delta k_L = ۲\,P(\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p) + \beta_s + \beta_{THz} - ۲\beta_p \qquad (۱)$$

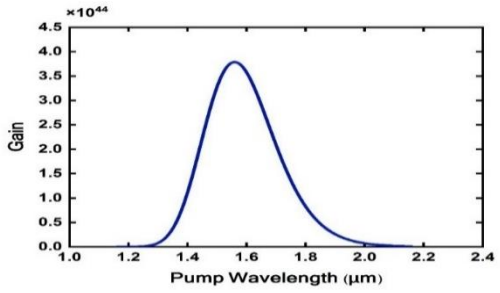
[1] Optical Parametric Oscillator
[2] Optical Parametric Amplifier
[3] Four Wave Mixing

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

که $\Delta k_{NL} = ۲P(\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p)$ بخش غیرخطی PhM است و γ_{ij} (I , j= s, p , t) ضریب غیر خطی خود مدولاسیون فازی و γ_i مدولاسیون فازی متقاطع و P پیک توانی لیزر پمپ است. بخش خطی رابطهٔ (۱) $\Delta k_L = \beta_s + \beta_t - ۲\beta_p$ است که β_i عدد موج در فرکانس ω_i است. به دلیل تبهگن بودن OPO ، فرکانس امواج تراهرتز و سیگنال دارای فاصلهٔ یکسانی با فرکانس پمپ هستند پس، $\Delta k_L = \beta_{۲p}\Omega_{sp}^{۲} + ۲\sum_{m=۲}^{\infty}\frac{\beta_{۲m}}{(۲m)!}\Omega_{sp}^{۲m}$ به گونه‌ای که $\Omega_{sp} = \omega_s - \omega_p = \omega_p - \omega_t$ و $\beta_{۲p}$ پاشندگی سرعت گروه و β_{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 Δk_{NL}، $\gamma(\omega) = \frac{\omega n_۲(\omega)}{c\bar{A}_{eff}}$ و $\bar{A}_{eff}$ سطح مقطع موثر مدی است که در یک موج گوسی برابر با $\pi w_{.j}$ است که $w_{.j}$ قطر کمر پرتوی j است. برای داشتن بهترین PhM، طول‌موج پمپ و تراهرتز و سیگنال به ترتیب ۱۵۶۰ nm و ۳۱/۲ µm و ۸۰۰ nm انتخاب شده‌اند. پس، $\Omega_{sp} = ۱۸۲/۶۹\text{THz}$ و $\Delta k_L = ۰/۰۱۰۰۰\ ^{۱}/_{\mu m}$ [۵] ، می‌شود. اگر کمر پرتو پمپ را به اندازهٔ طول‌موج آن متمرکز کنیم، $\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p = -۰/۲۹۰۸۷\ ۱/\text{Wm}$ می‌شود. برای ایجاد بهترین PhM پیک توانی لیزر W ۱۴۹۵۵ انتخاب شده است. بنابراین، $۰/۰۰۱۳۰\ ^{۱}/_{\mu m}$ $\Delta k =$ که معادل طول همدوسی $L_c = \frac{۲\pi}{\Delta k} = ۴۸۳۰\mu\text{m}$ است. برای آنکه در یک رفت و برگشت کامل همدوسی حفظ شود طول محیط برهم‌کنش ۲۴۰۰ µm انتخاب شده است. بهرهٔ تقویت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = \frac{P_t(L)}{P_t(۰)} = ۱ + \left[\frac{\gamma P}{g}\sinh(gl)\right]^{۲}$$

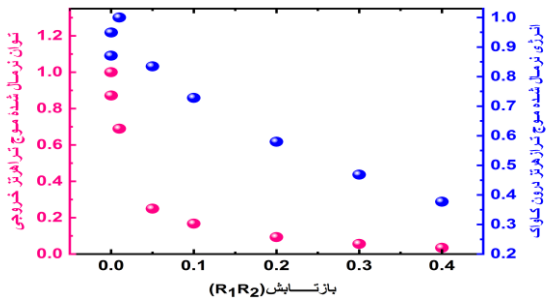
که $g = \left[(\gamma P)^{۲} - (\frac{\Delta k}{۲})^{۲}\right]^{\frac{۱}{۲}}$ است. مطابق با شکل(۳) بیشینه بهره در طول موج ۱/۵۶ µmدیده می‌شود که $\Delta k \approx ۰$ است. اگر طول موج پمپ را در گسترهٔ ۱/۵۸ µm -۱/۵۴ تغییر دهیم، می‌توانیم موج تراهرتز با گسترهٔ فرکانسی THz ۱۴/۶ - ۴/۷ را با این چیدمان تقویت کرد.



شکل ۲: تغییرات بهرهٔ فرآیند 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 ۳۱/۲ µm 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 می‌دهد. از اینرو، انتهای سمت چپ کاواک با لایهٔ نازکی از Ti یا NiCr لایه نشانی می‌شود. طول کاواک،مسیر پالس‌های ورودی و لایه‌نشانی‌هابه گونه‌ای انتخاب شده‌اند که در شرایط آزمایشگاهی قابل حصول باشند.

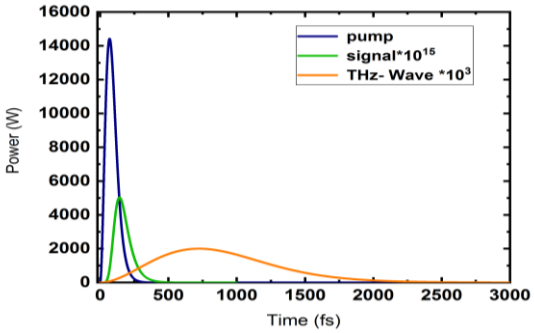


شکل ۳: تغییرات انرژی THz درون کاواک و توان THz خروجی از کاواک بر حسب بازتابش آینه‌های کاواک

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

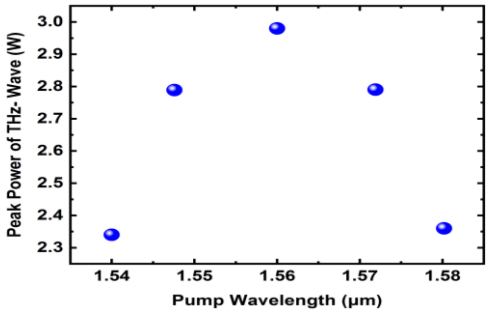
بخش سوم : نتایج و بحث

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 ۲ W بررسی می‌شود. مطابق با شکل ۵، طی فرآیند موج تراهرتز در حضور پمپ شروع به رشد می‌کند تا به یک حالت پایدار برسد. در فرکانس ۹/۶ THz توان موج تراهرتز تولید شده ۲/۰۲۸ W است.



شکل ۴ دینامیک تحول امواج در فرآیند FWM در OPO.

در این فرآیند، سیگنال بسیار ضعیفی نیز تولید می‌شود. بازده کلی تبدیل پمپ به THz تقویت شده با توجه به رابطهٔ $\eta = \frac{P_{THz}^{out}}{P_{Pump}^{in}}$ به دست می‌آید. P_{Pump}^{in} قلهٔ توان ورودی پمپ است. در این چیدمان، بازده کلی۰٫۰۱۴٪ و بازده تقویت THz $\eta_T = \frac{P_{THz}^{out}}{P_{iTHz}^{in}}$ برابر با ۱٫۰۴۹ است.



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

با تغییر طول موج پمپ در گسترهٔ ۱٫۵۴-۱٫۵۸ μm و ثابت نگه داشتن قلهٔ توانی آن می‌توانیم بذر ورودی را در گسترهٔ THz ۱۴/۶ - ۴/۷ تقویت کرد. شکل ۶، قلهٔ توان خروجی موج تراهرتز را در بازهٔ کوک‌پذیری نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

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 THz ۱۴/۶ - ۴/۷ است. در یک رفت و برگشت درون کاواک، بیشینه توان موج تراهرتز مربوط به فرکانس THz ۹/۶ با قلهٔ توانی W ۲٫۰۹۸ برای بذر موج تراهرتز ۲ W است. بازده کلی و تقویت به ترتیب ۰/۰۱۴٪ 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. 957–۹۵۹, ۲۰۰۶.

[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. ۵۵۷۹-۵۵۸۴, ۲۰۱۲.

[4] T. Amini, F. Jahangiri, "Optimized design for a terahertz parametric oscillator based on degenerate four- wave mixing in silicon nitride," *JOSA B*, vol. ۳۷, □□. ۹, □□. ۲۷۲۵-۲۷۳۱, ۲۰۲۰.

[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. ۲۱, □□. ۳۳۰۵۳-۳۳۰۶۶, ۲۰۲۱.

[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. 12475–۱۲۴۸۵, ۲۰۱۴.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]