



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۴۶۴-۱۰-A

## نوسانگر پارامتریک تراهرتز بر پایه ترکیب چهار موج در سیلیکون نیتريد

طاهره امینی، فاضل جهانگیری

[F\\_jahangiri@sbu.ac.ir](mailto:F_jahangiri@sbu.ac.ir)

چکیده - در این مقاله، یک نوسانگر پارامتریک تراهرتز (TPO)، بر مبنای ترکیب چهار موج (FWM) تبهگن، با قابلیت نوسان دهی هر چهار موج شرکت کننده در فرآیند با استفاده از ماده غیرخطی مرتبه سوم سیلیکون نیتريد، در یک کاواک فابری- پرو گزارش شده است. با تنظیم شرایط جورشدهگی فاز و تغییر طول موج پمپ در بازه  $1.055 - 1.0559 \mu\text{m}$  می توان موج تراهرتز با فرکانس مرکزی در بازه  $0.588 - 2.6826 \text{ THz}$  تولید کرد. بهترین شرایط جورشدهگی فاز در فرکانس مرکزی  $1 \text{ THz}$  رخ می دهد و در یک بار رفت و برگشت امواج درون کاواک، قله توان موج تراهرتز تولید شده به  $3.6 \mu\text{W}$  می رسد.

کلید واژه- جورشدهگی فازی، سیلیکون نیتريد، کوک پذیری، موج تراهرتز، نوسانگر پارامتریک.

## Terahertz Parametric Oscillation Based on Degenerate Four Wave Mixing in Silicon Nitride

Tahereh Amini, Fazel Jahangiri

[F\\_jahangiri@sbu.ac.ir](mailto:F_jahangiri@sbu.ac.ir)

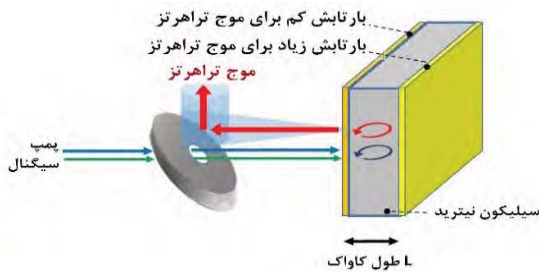
**Abstract-** In this paper, we report, a terahertz parametric oscillator (TPO), based on degenerate four waves mixing, with the ability to oscillate all four waves participating in the process in a Fabry-Perot cavity using nonlinear third-order nonlinear material of silicon nitride. By adjusting the phase matching conditions as well as the pump wavelength in a range of 1.055-1.0559, terahertz waves with central frequency in the range of 0.588-2.6826 THz are obtained. The best phase matching conditions occur at central frequency of 1THz, and the peak power of the generated terahertz wave reaches 3.6  $\mu\text{W}$  in a single round trip of the waves within the cavity.

Keywords: phase matching, silicon nitride, terahertz wave, tunability, parametric oscillator.

جدید در این حوزه، دارای بازده بالا، چیدمان ساده و کوک‌پذیری بالا  $5.73 - 3.6$  THz است [۹].

در این مقاله، با توجه به کاربردهای خاص تراهرتز در فرکانس‌های حدود  $1$  THz  $TPO$  با استفاده از  $SN$  بر مبنای  $FWM$  برای فرکانس‌های کمتر ارائه شده است و بهینه سازی کاواک، ویژگی‌های پرتو و شرایط جورشدهگی فاز به گونه‌ای انجام شده است که فرکانس موج تراهرتز تولیدشده به سمت فرکانس  $1$  THz سوق پیدا کند.

در بخش اول این مقاله روابط ریاضی ارائه می‌شود، در بخش دوم نتایج شبیه‌سازی عددی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و در بخش آخر نتیجه‌گیری آورده شده است.



شکل ۱: چیدمانمورد استفاده در شبیه‌سازی.

## روابط ریاضی

برای بررسی  $TPO$  بر مبنای  $FWM$  از چیدمانی مشابه شکل (۱) استفاده شده است. ابتدا شرایط جورشدهگی فاز را بررسی می‌کنیم:

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_{THz} \quad (1)$$

$$\Delta k = \Delta k_{NL} + \Delta k_L \quad (2)$$

$$\Delta k_{NL} = 2P\gamma = 2P(\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p) \quad (3)$$

$$\Delta k_L = \beta_{2p}\Omega_{sp}^2 + 2 \sum_{m=2}^{\infty} \frac{\beta_{2mp}}{(2m)!} \Omega_{sp}^{2m} \quad (4)$$

معادله (۱) رابطه فرکانسی  $FWM$  تبهگن است،  $\omega_s$  و  $\omega_p$  به ترتیب فرکانس‌های موج پمپ، سیگنال و تراهرتز هستند. معادله‌های (۳) و (۴) به ترتیب، بخش غیرخطی و خطی رابطه جورشدهگی فاز معادله (۲) هستند.  $P$  قله توان

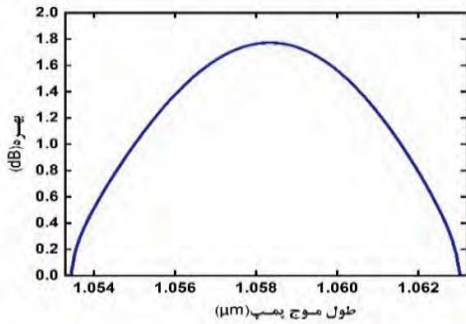
## مقدمه

در حوزه اپتیک، موج تراهرتز به بخشی از موج الکترومغناطیس گفته می‌شود که دارای فرکانس  $1$  THz تا  $10$  است [۱]. این ناحیه فرکانسی، به دلیل خواص منحصر به فرد در زمینه‌های مختلف داروسازی و پزشکی [۲]، صنعت [۳]، امنیتی [۴] کاربردهای ویژه‌ای دارد، ارائه روش تولید موج تراهرتز کوک‌پذیر، پرتوان و مقرون‌به‌صرفه از اهمیت خاصی برخوردار است. برای تولید موج تراهرتز با استفاده از روش‌های غیرخطی، راهکارهای متنوعی وجود دارد [۵]. در این بین نوسانگرهای پارامتریک ( $PO$ )<sup>۱</sup> به دلیل توانایی در تولید موج تراهرتز کوک‌پذیر، تکفام، همدوس و پرنرژژی جایگاه خاصی به خود اختصاص داده‌اند و بر مبنای تولید تفاضل فرکانسی و ترکیب چهارموج ( $FWM$ )<sup>۲</sup> عمل می‌کنند. از آنجا که مواد مورد استفاده در  $DFG$  باید دارای تقارن غیرمرکزی باشند، به موادی محدود می‌شوند که دارای جذب به نسبت بالایی در ناحیه تراهرتز هستند [۶] و جورشدهگی فازی در اپتیک غیرخطی مرتبه دوم تنها وابسته به طول موج فرآیند هستند. اما، مواد مورد استفاده در  $FWM$  بر مبنای اصول اپتیک غیرخطی مرتبه سوم عمل می‌کنند و محدودیتی در انتخاب نوع ماده غیرخطی برای آنها وجود ندارد. همچنین، شرایط جورشدهگی فاز در این فرآیند نه تنها وابسته به طول موج امواج است، بلکه با تغییر ویژگی‌های پمپ، می‌توان بهترین شرایط جورشدهگی فاز را در آنها ایجاد نمود. استفاده از  $PO$ ها مبتنی بر  $FWM$  برای تولید موج تراهرتز اولین بار در سال ۲۰۰۶ به صورت تئوری در فیبر نوری معرفی شد [۷]. در سال ۲۰۱۲، استفاده از فیبر فوتونیک کریستالی در  $PO$ ، برای تولید موج تراهرتز، پیشنهاد شد [۸]. در سال ۲۰۲۰، نوسانگر پارامتریک تراهرتز ( $TPO$ ) در سیلیکون نیتريد ( $SN$ ) معرفی شد که ضمن معرفی ماده

<sup>۱</sup>Parametric Oscillator

<sup>۲</sup>Four wave mixing

۱۰۵۵.۱ منجر به تولید موج تراهرتز در بازه  $2.6826 THz$  - ۵۸۸.۰ می‌شود.



شکل ۳: تغییرات بهره بر حسب طول موج پمپ.

در بررسی  $TPO$  از روابط کوپل‌شده زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{aligned} \frac{dA_p}{dt} &= -\frac{A_p}{2\tau_{1p}} + i(\gamma_p^c U_p + 2\gamma_{ps}^c U_s + 2\gamma_{pt}^c U_t)A_p + \\ & 2i\gamma_{pspt}^c A_s A_t A_p^* + \frac{iA_{pinp}(\Delta)}{\sqrt{\tau_{ep}}} \\ \frac{dA_s}{dt} &= -\frac{A_s}{2\tau_{1s}} + i(\gamma_s^c U_s + 2\gamma_{sp}^c U_p + 2\gamma_{st}^c U_t)A_s + \\ & i\gamma_{sptp}^c A_p^2 A_t^* + \frac{iA_{ins}(\epsilon)}{\sqrt{\tau_{es}}} \\ \frac{dA_t}{dt} &= -\frac{A_t}{2\tau_{1t}} + i(\gamma_t^c U_t + 2\gamma_{tp}^c U_p + 2\gamma_{ts}^c U_s)A_t + \\ & 2i\gamma_{tpsp}^c A_p^2 A_s^* \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن  $U_j = |A_j|^2$  انرژی موج  $j$  هستند،  $\tau_{ej} = \frac{2n_j L}{c} (\ln(1/R_f R_r))^{-1}$  و  $\tau_{lj} = (\frac{1}{\tau_{ej}} + \frac{c\alpha_j}{n_j})^{-1}$  ضریب جذب،  $n$  ضریب شکست و  $R_f$  و  $R_r$  و  $L$  به ترتیب بازتابش آینه‌های جلو، عقب و طول کاواک هستند. جمله آخر روابط (۵) و (۶) توان‌های ورودی کاواک هستند.

### نتایج شبیه سازی عددی

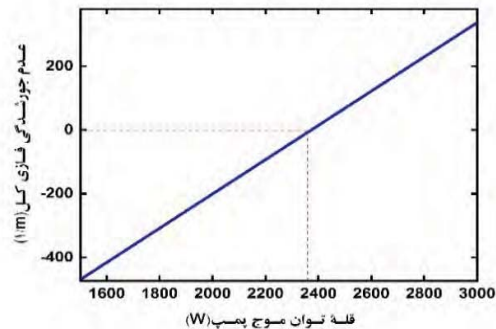
شکل (۴)، تحول زمانی موج پمپ با طول موج  $1055.1 nm$  با قله توان  $2373.5 W$ ، پهنای زمانی  $100 fs$  و بذر سیگنال با طول موج  $530 nm$  و توان  $2 W$ ، را نشان می‌دهد. شکل (۵) نشان می‌دهد که همزمان با این تحول تولید موج تراهرتز شروع می‌شود. طبق انتظار، نوسانگر سبب تولید و تقویت موج تراهرتز می‌شود و بیشینه توان خروجی موج تراهرتز در یک رفت و برگشت  $3.6 \mu W$  است.

پمپ است.  $\gamma_{ij}$  ( $j = t, s$  و  $p$ ) مدولاسیون فاز متقاطع  $\gamma_i$  و خودمدولاسیون فازی هستند.  $\beta_{2m}$  و  $\beta_{2p}$  به ترتیب پاشندگی سرعت گروه و پاشندگی‌های مراتب بالاتر زوج و پاشندگی  $\Omega_{sp} = \omega_s - \omega_p = \omega_p - \omega_{THz}$  هستند.

در بررسی پاشندگی  $SN$  از مرجع [۹] استفاده شده است. برای برقراری معادله (۱) باید فرکانس موج تراهرتز  $1 THz$  و طول موج سیگنال و پمپ به ترتیب باید  $530 nm$  و  $1055.1 nm$  باشند. بنابراین، بخش خطی جورشدهگی فاز  $11.2760 / mm$  است. همچنین  $\gamma(\omega) = \frac{\omega n_2(\omega)}{c A_{eff}}$

ضریب غیرخطی،  $n_2(\omega)$  ضریب کر و  $A_{eff}$  سطح مقطع مؤثر مدی هستند. مقدار پارامتر  $(\gamma_{sp} + \gamma_{tp} - \gamma_p)$  در موج‌گوسی که قطر باریکه آن به اندازه سه برابر طول موج پرتو کانونی شده باشد،  $1/Wm$  است. شکل (۲)، عدم جورشدهگی فاز را بر حسب پیک توان پمپ نشان می‌دهد. در جورشدهگی فاز قله توان پمپ تقریباً  $2373.5 W$  است. در این حالت عدم جورشدهگی فاز  $1/m$  است.  $0.027$  است.

از شکل (۱) مشاهده می‌شود  $FWM$  در کاواک فابری-پرو انجام می‌گیرد. ضریب غیرخطی کاواک  $(\gamma_{sp}^c + \gamma_{tp}^c)$  همچنین  $10 \times 1.972 THz / (\gamma_{tp}^c - \gamma_p^c)$  است. همچنین  $\gamma_{ijkl}^c = \frac{\omega_i n_2(\omega_i) c}{\sqrt{n_i n_j n_k n_l} V_{ijkl}}$  است،  $V_{ijkl}$  حجم مدی مؤثر و  $n_i$  ضریب شکست امواج هستند.



شکل ۴: تغییرات عدم جورشدهگی فازی بر حسب تغییر قله توان پمپ.

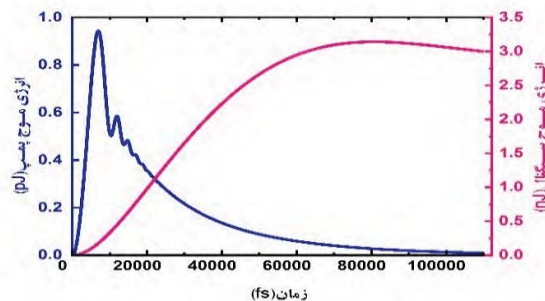
شکل (۳)، بهره نهایی در  $TPO$  مورد بحث را نشان می‌دهد. تغییر طول موج پمپ در محدوده  $1055.9 nm$  -

پذیری این سیستم  $588 THz$  است که تا کنون

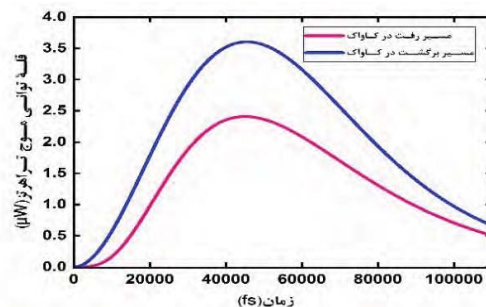
به روش بیان شده در این مقاله گزارش نشده است.

### مرجع‌ها

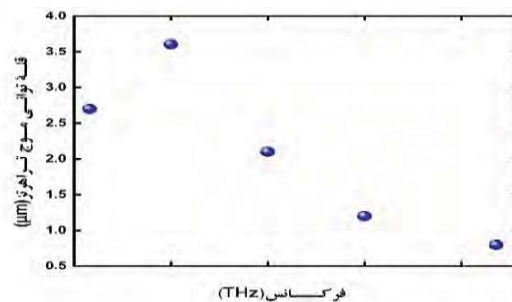
- [1] X.-C. Zhang, "Terahertz wave imaging: horizons and hurdles," *PHYSICS IN MEDICINE AND BIOLOGY*, vol. 47, no. 21, p. 3667-3677, 2002.
- [2] V. I. Fedorov, "The Biological Effects of Terahertz Laser Radiation as a Fundamental Premise for Designing Diagnostic and Treatment," *BIOPHYSICS*, vol. 62, no. 2, pp. 324-330, 2017.
- [3] J. Axel Zeitler, Yao-Chun Shen, "Industrial Applications of Terahertz Imaging," *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, vol. 171, pp. 451-489, 2012.
- [4] N. Laman, S. Sree Harsha, D. Grischkowsky, and J. S. Melinger, "7 GHz resolution waveguide THz spectroscopy of explosives related solids showing new features," *Opt. Express*, vol. 16, p. 4094-4105, 2008.
- [5] Herath P. Piyathilaka, Rishmali Sooriyagoda, Vikum Dewasurendra and others, "Terahertz generation by optical rectification in chalcopyrite crystals ZnGeP<sub>2</sub>, CdGeP<sub>2</sub> and CdSiP<sub>2</sub>," *Optics Express*, vol. 27, no. 12, pp. 16958-16965, 2019.
- [6] B. Sun, S. Li, J. Liu, E. Li, and J. Yao, "Terahertz-wave parametric oscillator with a misalignment-resistant tuning cavity," *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 10, p. 1845-1847, 2011.
- [7] 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. 957-959, 2006.
- [8] 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. 5579-5584, 2012.
- [9] T. Amini, F. Jahangiri, "Optimized design for a terahertz parametric oscillator based on degenerate four-wave mixing in silicon nitride," *JOSA B*, vol. 37, no. 9, pp. 2725-2731, 2020.



شکل ۴: تحولات زمانی پمپ و سیگنال طی رفت و برگشت درون کاواک.



شکل ۵: مقایسه توان موج تراهرتز تولید شده در مسیرهای رفت و برگشت درون کاواک.



شکل ۶: قله توان موج تراهرتز تولید شده طی کوک‌پذیری TPO.

با دور شدن از فرکانس  $1 THz$  و رفتن به سمت فرکانس-هایی با عدم جورشدگی فازی بیشتر، قله توان موج تراهرتز کم می‌شود. این رفتار در شکل (۶) نشان داده شده است.

### نتیجه‌گیری

تولید موج تراهرتز به روش TPO بر مبنای FWM در ماده SN بررسی شده است. پمپ  $fs$  با قله توان  $2373.5 W$  و طول موج مرکزی  $58.1 nm$  و بذر سیگنال  $2 W$  با طول موج  $530 nm$ ، منطبق بر جورشدگی فازی موج تراهرتز با فرکانس  $1 THz$  مورد استفاده قرار گرفته است. کوک-