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

تقویت همدوس تابش تراهرتز تولید شده از یکسوسازی نوری پالس‌های فوق کوتاه در نانولوله های کربنی

محمد حسنی*، فاضل جهانگیری و مرضیه محمدی

*Mohammad.hassani.aa@gmail.com

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده – نانولوله های کربنی نوع کایرال دارای خواص اپتیکی غیرخطی مرتبه دوم قابل توجهی هستند و می توانند برای تولید تابش تراهرتز از طریق فرایند یکسوسازی نوری مورد استفاده قرار گیرند. اما دستیابی به بازده بالا نیازمند فراهم شدن شرایط تقویت همدوس در طول محیط بهره و تنظیم سرعت فاز و گروه موج تراهرتز تولید شده و لیزر پمپ است که به بررسی آن می‌پردازیم. برای این منظور، عوامل موثر بر این پدیده شامل پاشندگی نانولوله‌های کربنی در بازه فرکانسی مرئی و تراهرتز، طول پالس لیزری و طول موثر نانولوله‌های کربنی را به دست آورده و بهینه می‌کنیم. همچنین طیف و پروفایل زمانی میدان تراهرتز به ازای طول های مختلف محیط بهره برگرفته از مبانی نظری مورد استفاده را بررسی می‌کنیم.

کلید واژه- اپتیک غیرخطی، تابش تراهرتز، لیزر فوق کوتاه، نانولوله های کربنی، یکسوسازی نوری

Coherent Amplification of Terahertz Radiation Generated by Optical Rectification of Ultrashort Laser Pulses in Carbon Nanotubes

Mohammad Hassani*, Fazel Jahangiri, Marzieh Mohammadi

*Mohammad.hassani.aa@gmail.com

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

Abstract- Chiral carbon nanotubes have significant second-order nonlinear optical properties and can be used to produce terahertz radiation through the optical rectification process. But achieving high efficiency requires the provision of coherent amplification conditions along the gain medium and adjustment of the phase velocity of terahertz wave produced and the group velocity of laser wave of the pump. In this article, we examine the above conditions. For this purpose, the factors affecting this phenomenon include the scattering behavior of carbon nanotubes in the visible frequency range and terahertz range, the laser pulse length used and the effective length

Commented [D1]: آدرس ایمیل نوشته شود.

Commented [T2]: فونت مطابق با فرمت نیست

Commented [D3]: کلیدواژه بولد نباشد.وسطچین

Commented [D4]: آدرس ایمیل نوشته شود.

Commented [D5]: سایز مطابق با نمونه مقاله نیست. وسطچین

Commented [T6]: سایز مطابق با فرمت نیست

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

of carbon nanotubes are obtained and optimized. We also examine the spectra and time profile of the terahertz field for different lengths of the environment using the theoretical foundations used.

Commented [DV]: چپ چین باشد.

Keywords: Nonlinear optics, terahertz radiation, ultra-short laser, carbon nanotubes, optical rectifier

Commented [DA]: چپ چین باشد و بولد نباشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

فرآیند یکسوسازی نوری از متداول ترین روش های تولید تابش تراهرتز پالسی مبتنی بر به کارگیری پالس های لیزری فمتوثانیه است. در این روش، محیط های غیرخطی مرتبه دوم که تقارن مرکزی ندارند، نظیر کریستال های $LiNbO_3$ [۱]، $ZnTe$ [۲] و ZnS [۳] مورد تابش لیزر فمتوثانیه قرار گرفته و در ناحیه فرکانسی که عمدتا توسط طول پالس لیزری مورد استفاده تعیین می شود، تولید تراهرتز می کنند و شرایط بهینه جهت تولید تابش تراهرتز بدست می آید [۲] و [۴]. در کنار کریستال های مورد اشاره، جستجو برای یافتن محیط های بهره جایگزین با خاصیت غیرخطی مرتبه دوم قابل ملاحظه نیز ادامه داشته است. در همین راستا، اخیرا استفاده از نانولوله های کربنی نوع کایرال از میان سه نوع کایرال، زیگزاگ و دسته صندلی، به دلیل وجود عدم تقارن مرکزی در ساختار هندسی شان که ناشی از نوع چینش اتم های کربن است و در نتیجه دا شتن خا صیت غیرخطی مرتبه دوم، برای تولید تابش تراهرتز به روش یکسوسازی نوری مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. در کنار خاصیت غیرخطی قابل ملاحظه، شرط ا سا سی دیگر در د ستیابی به بهره نهایی بالا در یکسو سازی نوری، برهم نهی همدوس و سازنده تراهرتز تولید شده در قسمت های مختلف محیط بهره می با شد. این مساله به میزان اختلاف سرعت فاز تراهرتز تولید شده با سرعت گروه پالس لیزری فوق کوتاه مورد استفاده بستگی دارد. بنابراین رفتار پاشندگی نانولوله های کربنی در دونا حیه فرکانسی مر ئی و ترا هر تزو طول پالس لیزری مورد استفاده، بر میزان اختلاف سرعت ایجاد شده تاثیر گذار خواهند بود. همچنین، با ید تو جه داشت که این اختلاف سرعت، بسته به طول برهمکنش به کار گرفته شده، متغیر خواهد بود. با در نظر گرفتن همه این عوامل، به بررسی شرایط بهینه تقویت همدوس تراهرتز تولید شده در نانولوله های کربنی کایرال و تک دیواره توسط فرآیند یکسوسازی نوری می پردازیم.

اصول تئوری

در فرآیند یکسوسازی نوری، یک پالس اپتیکی با یک ماده غیرخطی مرتبه دوم و دارای عدم تقارن مرکزی برهمکنش کرده و یک قطبش غیرخطی با فرکانس نوسان صفر (DC) القامی کند. قطبش ایجاد شده در حالت کلی و در یک محیط ناهمسانگرد به صورت زیر بیان می شود [۶]؛

(۱)

$$P_i^{(2)}(\Omega) = \epsilon_0 \sum_{jk} \sum_{(nm)} \chi^{(2)}(\Omega;\omega_n,\omega_m) E_j^*(\omega_n) E_k(\omega_m)$$

مشاهده میشود تانسور پذیرفتاری مرتبه دوم بدلیل پاشنده بودن محیط، به دو پارامتر ω_n و ω_m وابسته است. در رابطه (۱)، نماد (nm) به این معنی است که فقط جفت فرکانسی که جمعشان برابر با $\omega_n+\omega_m$ باشد، در این جمع ظاهر می شوند. با لحاظ فرکانس تولیدی صفر، رابطه (۱) به صورت زیر ساده خواهد شد:

(۲)

$$P_i^{OR}(0) = 2\epsilon_0 \sum_{jk} \left(\chi^{(2)}_{ijk}(0;-\omega,\omega) E_j^*(\omega) E_k(\omega)\right)$$

همچنین، در صورتیکه تقارن جایگشت کامل و کلینمن برای محیط برقرار باشد، پذیرفتاری نانولوله کربنی تک دیواره به صورت ماتریس زیر ساده خواهد شد [۷]:

(۳)

$$[d]^{OR}_{CNT} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta \end{bmatrix}$$

که در آن β ضریب تناسب بین قطبش غیرخطی و میدان های جایگزیده ایجاد شده در محیط، مطابق رابطه (۴) می باشد.

(۴)

$$P_i^{NL}(\omega_m+\omega_n) = N\epsilon_0 \sum_{jk}\sum_{(nm)} \beta_{ijk}(\omega_m+\omega_n;\omega_n,\omega_m) E_j^{loc}(\omega_n) E_k^{loc}(\omega_m)$$

در رابطه (۴)، N چگالی تعداد مولکول های ماده غیرخطی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

می‌باشـــد.ازطرفی،میدان‌الکتریکی‌یک‌پالس‌اپتیکی‌باپروفایل زمانی‌گاوسی‌وپروفایل‌فضایی‌تخت‌وفرکانس‌مرکزی $\omega.$رامی‌توان‌در حالت‌کلی‌به‌صورت‌زیردرنظرگرفت[۸]:

(۵)

$$E_{opt}(z,t) = E_{\cdot}\, e^{-a(z)\left(t-\frac{z}{v_{gr}(\omega_{\cdot})}\right)^{2}} e^{-i\omega_{\cdot}\left(t-\frac{z}{v_{ph}(\omega_{\cdot})}\right)}$$

که‌درآن،$a(z) = a_R(z) + ia_i(z)$است بطوریکه[۷]:

(۶)

$$a_R(z) = \frac{a_{\cdot}}{1 + 4a_{\cdot}^{2}\left(\frac{d^{2}k}{d\omega^{2}}\Big|_{\omega=\omega_{\cdot}}\right)^{2} z^{2}}$$

(۷)

$$a_i(z) = \frac{2a_{\cdot}^{2}\left(\frac{d^{2}k}{d\omega^{2}}\Big|_{\omega=\omega_{\cdot}}\right) z}{1 + 4a_{\cdot}^{2}\left(\frac{d^{2}k}{d\omega^{2}}\Big|_{\omega=\omega_{\cdot}}\right)^{2} z^{2}}$$

$$a_{\cdot} = \frac{4\square\square(2)}{\tau_p^{2}} \qquad (8)$$

و$\boldsymbol{\tau_p}$طول‌پالس‌اپتیکی‌است.درصورتیکه‌چگالی‌جریان‌وبارآزاد درمحیط‌نداشته‌باشیم‌ومحیط‌غیرمغناطیسی‌وبه‌حدی‌نازک باشـد‌که‌بتوان‌ازاثرات‌انتشـار‌چشـم‌پوشـی‌کرد،معادله‌موج‌را میتوان‌به‌صورت‌زیرنوشت:

(۹)

$$\frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}} E_{THZ}(z,t) - \frac{1}{\epsilon_{\cdot}\, c^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} D_{THZ}(z,t) = \frac{1}{\epsilon_{\cdot}\, c^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}} P_{CNT}^{OR}(z,t)$$

که‌معادل‌رابطه‌زیردرفضای‌فرکانس‌است:

(۱۰)

$$\frac{\partial^{2}}{\partial z^{2}} \boldsymbol{E_{THZ}(z,\omega)} - \frac{\omega^{2}}{\epsilon_{0}\, c^{2}}\ \boldsymbol{D_{THZ}(z,\omega)} = \frac{\omega^{2}}{\epsilon_{0}\, c^{2}}\ \boldsymbol{P_{OR}\,(z,\omega)}$$

ازحل‌معادله‌موج،میدان‌تراهرتزتولیدشده‌به‌صورت‌زیر بدست می آید:

(۱۱)

$$\begin{aligned} \boldsymbol{E_{THZ}(z,\omega)} = {} & \boldsymbol{C_1(z,\omega)e^{ik(\omega)z}} \\ & + \boldsymbol{C_2(z,\omega)e^{-ik(\omega)z}} \\ & + \boldsymbol{C_1'(z,\omega)e^{-ik(\omega)z}} \\ & + \boldsymbol{C_2'(z,\omega)e^{ik(\omega)z}} \end{aligned}$$

دراینجافرض‌کرده‌ایم‌که‌جهت‌میدان‌الکتریکی‌پالس‌پمپ‌در مختصات‌کروی‌به‌صورتی‌است‌که$\phi = 0$ و $\theta = 45$.در بخش‌بعدبه‌ازای‌مقادیرمختلف‌پارامترهای‌موثردرتابش‌تراهرتز تولیدشده‌تقویت‌وتضعیف‌میدان‌تابشی‌موردبررسی‌قرارمیگیرد

نتایج شبیه سازی

بااستفاده‌ازروابط‌مورداشاره‌دربخش‌قبل،به‌مقایسه‌دامنه‌میدان تراهرتزتولیدشـده‌فواصـل‌مختلف‌محیط‌بهره‌ودرنهایت‌بهینه‌سـازی‌تراهرتزخروجی‌می‌پردازیم.دراینجاطول‌پالس‌برابر ۲۵۰ فمتوثانیه‌فرض شده‌است‌که‌باعث‌می شود،فرکانس‌پالس‌تولید شده‌دربازه۰٫۱تا۱۰تراهرتزقرارگیرد.همچنین‌طول‌محیط‌در بازه‌صفرتا۵، ۰میلیمتردرنظرگرفته‌میشود.باتوجه‌به‌بازه‌انتخاب شـده‌برای‌تابش‌تراهرتزتولیدشـده،طول‌همدوسـی‌تابش،برابر ۴٫۶۵متروبیش‌ازطول‌نانولوله‌کربنی(تا۴۰۰میکرون)می‌باشد. ازطرفی‌باتولیدوانتشـار‌تابش‌تراهرتزدرطول‌نانوله‌کربنی‌بدلیل تکمیل‌ظرفیت‌دوقطبی‌شـــدن‌اتم‌های‌ماده،با‌پدیده‌اشـــباع مواجه‌می‌شویم.تعریف‌متداول‌طول‌اشباع‌بادرنظرگرفتن‌طولپ الس اپتیکی$\boldsymbol{\tau_p}$، مطابق با رابطه ۱۱ می باشد[۸]:

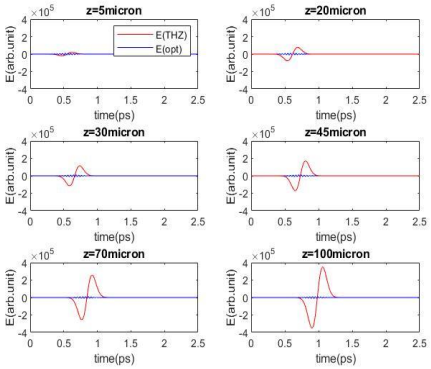
(۱۲)

$$\boldsymbol{l_w = \frac{c\tau_p}{|n_{opt} - n_{THZ}|}}$$

نانولوله‌های‌کربنی،به‌عنوان‌موادی‌غیرخطی،ناهمســـانگردو پاشـــنده‌درنظرگرفته‌می‌شـــوند[۹].درصـــورتیکه‌محیط‌دارای پاشـــندگی‌پله‌ای(*n_opt=1.5,n_thz=1.25*)درنظرگرفته شـــود،طول‌اشـــباع‌برابر۲۲۸میکرومترخواهدبود.دامنه‌میدان تراهرتزتولیدشـده‌درطول‌های‌متفاوت‌ازنانولوله‌کربنی‌بادرنظر گرفتن‌پاشـندگی‌پله‌ای‌محیط‌وبه‌کمک‌روابط(۵)تا(۸)و(۱۱)و ضرایب‌بدست‌آمده‌ازاین‌رابطه‌پس‌ازتبدیل‌رابطه‌به‌فضای‌زمان، درشکل(۱)مقایسه‌کرده‌ایم.مشاهده‌می‌شودباافزایش‌طول‌نانو لوله‌کربنی‌شـــدت‌میدان‌تولیدشـــده‌افزایش‌یافته‌وفرکانس مرکزی‌وپهنای‌فرکانسی‌میدان‌الکتریکی‌تراهرتزوابسته‌به‌طول محیط‌برهمکنش بدلیل‌وجود پاشـــندگی‌پله‌ای‌محیط د چار

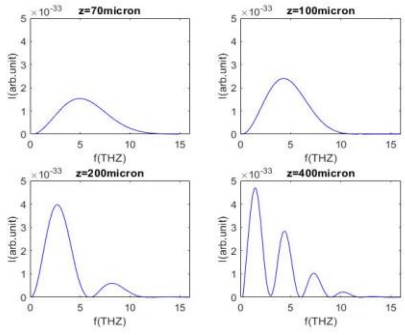
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

تغییر می‌شـــود.هم‌چنین مقایســـه دامنه میدان اپتیکی در حال انتشار با میدان تراهرتز تولید شده در بازه ۵ تا ۷۰ میکرومتر در شکل (۱) آمده است. مشاهده می‌شود با افزایش طول نانولوله کربنی، می دان اپتیکی با دامنه ثابت و میدان تراهرتز تولیدشـــده با افزایش تدریجی دامنه تا رسیدن به طول اشباع منتشر می‌شوند.



شکل ۱. میدان اپتیکی و تراهرتز منتشر شده در طول های مختلف از محیط بهره

نمودار طیفی شدت میدان تراهرتز تولید شده در طولهای مختلف نانولوله کربنی که از رابطه (۱۱) حاصل شده در شکل (۲) آمده است



شکل۲. توزیع فرکانسی میدان تراهرتز در محیط غیرخطی در طول های مختلف از نانولوله کربنی

که موید افزایش شدت تراهرتز با افزایش طول محیط انتشار نا شی از برهم‌نهی میدان‌های تراهرتز تولیدشـده حین انتشـار در نانولوله کربنی می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری

طول نانولوله کربنی به‌عنوان یکی از عوامل موثر تقویت هم‌دوس تابش تراهرتزطی فرایند یکســـوســـازی نوری مورد بررســـی قرار گرفت. میدان تابشی و شدت آن در طول‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ میکرون و بازه ۵ تا ۷۰ میکرون از نانولوله کربنی بررسـی شـد که در ۵ میکرون، دامنه میدان دارای کمترین مقدار و به ازای طولهای ۲۲۸ میکرون و بالاتر، در بیشترین مقدار خود به اشباع رسیده و ثابت خواهد ماند.

منابع:

[۱] “Generation of ۱۰μJ ultrashort terahertz pulses by optical rectification,” doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۶۳/۱,۲۷۳۴۳۷٤.

[۲] “Optimized terahertz generation via optical rectification in ZnTe crystals,” doi: https://doi.org/۱۰,۱۳٦٤/JOSAB.۳۱,۰۰۰۱٤۹.

[۳] “Terahertz optical rectification from ⟨۱۱۰⟩ zinc-blende crystals,” doi: https://doi.org/۱۰,۱۰۶۳/۱,۱۱۱۹۲۲.

[٤] J. H. J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, “Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, and J. Hebling.”

[٥] M. Hassani and F. Jahangiri, “Tuning single-walled aligned carbon nanotubes for optimal terahertz pulse generation through optical rectification of ultrashort laser pulses,” Opt. Express, vol. ۲۹, no. ۲۳, p. ۳۸۳٥۹, *Nov.* ۲۰۲۱, *doi:* ۱۰,۱۳٦٤/*OE.*٤٤۲۱٦۸.

[٦] R. boyd, *nonlinear optics*. .

[۷] M. Rérat, P. Karamanis, B. Civalleri, L. Maschio, V. Lacivita, and B. Kirtman, “Ab initio calculation of nonlinear optical properties for chiral carbon nanotubes. Second harmonic generation and dc-Pockels effect,” *Theor. Chem. Acc.*, vol. ۱۳۷, no. ۲, pp. ۱–۱٥, Feb. ۲۰۱۸, doi: ۱۰,۱۰۰۷/s۰۰۲۱٤-۰۱۷-۲۱۸۷-۷

[۸] Y. S. Lee, Principles of terahertz science and technology. ۲۰۰۹.

[۹] “Optical properties of graphene,” [Online]. Available: https://iopscience.iop.org/article/۱۰,۱۰۸۸/۱۷٤۲-٦٥۹٦/۱۲۹/۱/۰۱۲۰۰٤/*meta*.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]