



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 همدوسی تابش تراهرتز تولید شده از یکسوسازی نوری پالس‌های فوق کوتاه در نانولوله‌های کربنی

محمد حسنی*، فاضل جهانگیری و مرضیه محمدی

*Mohammad.hassani.aa@gmail.com

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده - نانولوله‌های کربنی نوع کایرال دارای خواص اپتیکی غیرخطی مرتبه دوم قابل توجهی هستند و می‌توانند برای تولید تابش تراهرتز از طریق فرایند یکسوسازی نوری مورد استفاده قرار گیرند. اما دستیابی به بازده بالا نیازمند فراهم شدن شرایط تقویت همدوسی 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 طول‌های مختلف محیط بهره برگرفته از مبانی نظری مورد استفاده را بررسی می‌کنیم.

کلیدواژه - اپتیک غیرخطی، تابش تراهرتز، لیزر فوق کوتاه، نانولوله‌های کربنی، یکسوسازی نوری

Commented [D1]: آدرس ایمیل نوشته شود.

Commented [T1]: فونت مطابق با فرمت نیست

Commented [D2]: کلیدواژه بولد نباشد. وسط چین

Commented [D3]: آدرس ایمیل نوشته شود.

Commented [D4]: سبب مطابق با نمونه مقاله نیست. وسط چین

Commented [T1]: سبب مطابق با فرمت نیست

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, Evvin, 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

بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران

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.

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

Commented [DV]: چپ چین باشد.

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

اصول تئوری

در فرآیند یکسوسازی نوری، یک پالس اپتیک با یک ماده غیر خطی مرتبه دوم دارای عدم تقارن مرکزی برهمکنش کرده و یک قطبش غیر خطی با فرکانس نوسان صفر (DC) القای می‌کند. قطبش ایجاد شده در حالت کلی و در یک محیط ناهمسانگرد به صورت زیر بیان می‌شود [۶]:

(۱)

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

مشاهده می‌شود تا نوسان 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 می‌شوند. با لحاظ فرکانس تولیدی صفر، رابطه (۱) به صورت زیر ساده خواهد شد:

(۲)

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

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)

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

که در آن β ضریب تناسب بین قطبش غیر خطی و میدان‌های جایگزیده ایجاد شده در محیط، مطابق رابطه (۴) می‌باشد.

(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 مولکول‌های ماده غیر خطی

مقدمه

فرآیند یکسوسازی نوری از متداول‌ترین روش‌های تولید تابش تراهرتز پالسی مبتنی بر به کارگیری پالس‌های لیزری فمتوثانیه است. در این روش، محیط‌های غیر خطی مرتبه دوم که تقارن مرکزی ندارند، نظیر کریستال‌های $LiNbO_3$ [۱]، $ZnTe$ [۲] و ZnS [۳] مورد تابش لیزر فمتوثانیه قرار گرفته و در ناحیه فرکانسی که عمدتاً توسط طول پالس لیزری مورد استفاده تعیین می‌شود، تولید تراهرتز می‌کنند و شرایط بهینه جهت تولید تابش تراهرتز بدست می‌آید [۲] و [۴]. در کنار کریستال‌های مورد اشاره، جستجو برای یافتن محیط‌های بهره‌جایگزین با خاصیت غیر خطی مرتبه دوم قابل ملاحظه نیز ادامه داشته است. در همین راستا، اخیراً استفاده از نانولوله‌های کربنی نوع کایرال از میان سه نوع کایرال، زیگزاگ و دسته‌صندلی، به دلیل وجود عدم تقارن مرکزی در ساختار هندسی شان که ناشی از نوع چینش اتم‌های کربن است و در نتیجه داشتن خاصیت غیر خطی مرتبه دوم، برای تولید تابش تراهرتز به روش یکسوسازی نوری مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. در کنار خاصیت غیر خطی قابل ملاحظه، شرط اساسی دیگر در دستیابی به بهره‌نهایی بالاتر یکسوسازی نوری، برهم‌نهی هم‌دوس و سازنده تراهرتز تولید شده در قسمت‌های مختلف محیط بهره‌می‌باشد. این مسئله به میزان اختلاف سرعت فاز تراهرتز تولید شده با سرعت گروه پالس لیزری فوق کوتاه مورد استفاده بستگی دارد. بنابراین رفتار پاشندگی نانولوله‌های کربنی در دونا حیه فرکانسی مرئی و تراهرتز و طول پالس لیزری مورد استفاده، بر میزان اختلاف سرعت ایجاد شده تاثیر گذار خواهند بود. همچنین، با پدیده 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 نانولوله‌های کربنی کایرال و تک دیواره توسط فرآیند یکسوسازی نوری می‌پردازیم.

Commented [D۹]: سربرگ‌ها و شماره صفحات مطابق با نمونه مقاله نیست.

سر تیترها باید وسط چین باشند. فونت سر تیتر نباید *Italic* باشد.

Commented [D۱۰]: تمام روابط و حروف انگلیسی در متن باید با فونت Times New باشند.

Commented [mm۱۱R۱۰]: انجام شد: فرمول‌ها پس از ثبت تغییر دوباره به حالت قبل برمیگردد.

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

در اینجا فرض کرده ایم که جهت میدان الکتریکی پالس پمپ در

مختصات کروی به صورتی است که $\theta = 45^\circ$ و $\phi = 0$ در

بخش بعدی به ازای مقادیر مختلف پارامترهای موثر در تابش تراهرتز تولید شده تقویت و تضعیف میدان تابشی مورد بررسی قرار میگیرد

نتایج شبیه سازی

با استفاده از روابط مورد اشاره در بخش قبل، به مقایسه دامنه میدان تراهرتز تولید شده فواصل مختلف محیط بهره و در نهایت بهینه سازی تراهرتز خروجی می پردازیم. در اینجا طول پالس برابر 250 فمتوثانیه فرض شده است که باعث می شود، فرکانس پالس تولید شده در بازه 100 تا 1000 تراهرتز قرار گیرد. همچنین طول محیط در بازه صفر تا 5 میلی متر در نظر گرفته میشود. با توجه به بازه انتخاب شده برای تابش تراهرتز تولید شده، طول همدوسی تابش، برابر 4.65 متر و بیش از طول نانولوله کربنی (تا 400 میکرون) می باشد. از طرفی با تولید و انتشار تابش تراهرتز در طول نانولوله کربنی بدلیل تکمیل ظرفیت دو قطبی شدن اتم های ماده، با پدید آمدن اشباع مواجه می شویم. تعریف متداول طول اشباع بادر نظر گرفتن طول پالس اپتیکی τ_p مطابق با رابطه ۱۱ می باشد [۸]:

(۱۲)

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

نانولوله های کربنی، به عنوان موادی غیر خطی، ناهمسانگرد و پاشنده در نظر گرفته می شوند [۹]. در صورتیکه محیط دارای پاشندگی پله ای $(n_{opt}=1.5, n_{thz}=1.25)$ در نظر گرفته شود، طول اشباع برابر 228 میکرومتر خواهد بود. دامنه میدان تراهرتز تولید شده در طول های متفاوت از نانولوله کربنی بادر نظر گرفتن پاشندگی پله ای محیط و به کمک روابط (۵) تا (۸) و (۱۱) و ضرایب بدست آمده از این رابطه پس از تبدیل رابطه به فضای زمان، در شکل (۱) مقایسه کرده ایم. مشاهده می شود با افزایش طول نانولوله کربنی شدت میدان تولید شده افزایش یافته و فرکانس مرکزی و پهنای فرکانسی میدان الکتریکی تراهرتز وابسته به طول محیط برهمکنش بدلیل وجود پاشندگی پله ای محیط دچار

می باشد. از طرفی، میدان الکتریکی یک پالس اپتیکی با پروفایل زمانی گاوسی و پروفایل فضایی تخت و فرکانس مرکزی ω رami- توان در حالت کلی به صورت زیر در نظر گرفت [۸]:

(۵)

$$E_{opt}(z, t) = E_0 e^{-a(z)} \left(t - \frac{z}{v_{gr}(\omega)} \right) e^{-i\omega \left(t - \frac{z}{v_{ph}(\omega)} \right)}$$

که در آن، $a(z) = a_R(z) + ia_I(z)$ است بطوریکه [۷]:

(۶)

$$a_R(z) = \frac{a}{1 + \epsilon a^2 \left(\frac{d^2 k}{d\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0} \right)^2 z^2}$$

(۷)

$$a_I(z) = \frac{\epsilon a \left(\frac{d^2 k}{d\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0} \right) z}{1 + \epsilon a^2 \left(\frac{d^2 k}{d\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0} \right)^2 z^2}$$

$$a_0 = \frac{\epsilon_0 \omega_0^2}{\tau_p}$$

(۸)

و τ_p طول پالس اپتیکی است. در صورتیکه چگالی جریان و بار آزاد در محیط نداشته باشیم و محیط غیر مغناطیسی و به حدی نازک باشد که بتوان از اثرات انتشار چشم پوشی کرد، معادله موج را میتوان به صورت زیر نوشت:

(۹)

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_{THZ}(z, t) - \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} D_{THZ}(z, t) = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P_{CNT}^{OR}(z, t)$$

که معادل رابطه زیر در فضای فرکانس است:

(۱۰)

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_{THZ}(z, \omega) - \frac{\omega^2}{\epsilon_0 c^2} D_{THZ}(z, \omega) = \frac{\omega^2}{\epsilon_0 c^2} P_{OR}(z, \omega)$$

از حل معادله موج، میدان تراهرتز تولید شده به صورت زیر

بدست می آید:

(۱۱)

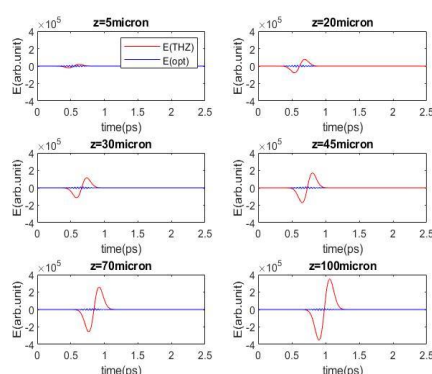
بحث و نتیجه گیری

طول نانولوله کربنی به عنوان یکی از عوامل موثر تقویت همدوس تابش تراهرتزی فرایندیکسوسازی نوری مورد بررسی قرار گرفت. میدان تابشی و شدت آن در طول های ۲۰۰ و ۴۰۰ میکرون و بازه ۵ تا ۷۰ میکرون از نانولوله کربنی بررسی شد 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:

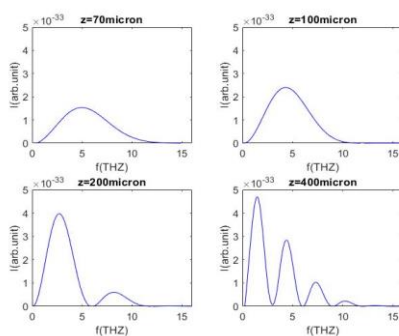
- [۱] "Generation of ۱۰ μJ ultrashort terahertz pulses by optical rectification," doi: <https://doi.org/10.1063/1.2734374>.
- [۲] "Optimized terahertz generation via optical rectification in ZnTe crystals," doi: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.31.000149>.
- [۳] "Terahertz optical rectification from <۱۱۰> zinc-blende crystals," doi: <https://doi.org/10.1063/1.111922>.
- [۴] 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."
- [۵] 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. ۳۸۳۵۹, Nov. ۲۰۲۱, doi: 10.1364/OE.442124.
- [۶] R. Boyd, *nonlinear optics*.
- [۷] M. Rérat, P. Karamanis, B. Civalieri, 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. ۱-۱۵, Feb. ۲۰۱۸, doi: 10.1007/s00214-017-21۸۷-۷.
- [۸] Y. S. Lee, Principles of terahertz science and technology. ۲۰۰۹.
- [۹] "Optical properties of graphene," [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/129/1/012004/meta>.

تغییر می شود. هم چنین مقایسه دامنه میدان اپتیکی در حال انتشار با میدان تراهرتزی تولید شده در بازه ۵ تا ۷۰ میکرون و متر در شکل (۱) آمده است. مشاهده می شود با افزایش طول نانولوله کربنی، می دان اپتیکی با دامنه ثابت و میدان تراهرتزی تولید شده با افزایش تدریجی دامنه تا رسیدن به طول اشباع منتشر می شوند.



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

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



شکل ۲. توزیع فرکانسی میدان تراهرتزی در محیط غیرخطی در طول های مختلف از نانولوله کربنی

که موید افزایش شدت تراهرتزی با افزایش طول محیط انتشار ناشی از برهم نهی میدان های تراهرتزی تولید شده حین انتشار در نانولوله کربنی می باشد.