



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 : ۱-۲۴۹۴-۱۰-A

تابش تراهرتز توسط زنش باریکه‌های لیزر گاوسی و پلاسمای نانوخوشه

ربابه نعمتی سیاهمزیگی، ساعد جعفری

دانشکده فیزیک دانشگاه گیلان, S.Jafari@guilan.ac.ir, rnemati@phd.guilan.ac.ir

چکیده- در این مقاله تولید تابش تراهرتز (THz) توسط زنش دوباریکه‌ی لیزر فوق گاوسی با فرکانس‌های ω_1 و ω_2 در یک محیط پلازما نانو خوشه‌به لحاظ تئوری بررسی شده است. میدان الکتریکی پرتوهای لیزر با نانو ساختار ارتباط برهمکنش می‌کند، منجر به یونیزه شدن اتمهای خوشه و تولید نانو پلازما می‌شود. برهم کنش پرتوهای لیزر با ابرهای الکترونیکی نانو پلازما، نیروی پاندروماتیو ایجاد می‌کند که منجر به ایجاد جریان الکترون ماکروسکوپی در فرکانس زنش می‌شود که می‌تواند تابش THz را ایجاد کند. معادلات موج THz و بازده THz به صورت تحلیلی در محیط پلاسمای نانوخوشه استخراج می‌شوند. اثرات چگالی و شعاع نانو خوشه‌ها، عرض و شدت پرتوی لیزر و لیزرهای فوق گاوسی بر بازده تابش THz در یک ساطع کننده THz مبتنی بر نانو پلازما بررسی شده است. نتایج نشان داد که حداکثر دامنه میدان برای تابش THz نزدیک به فرکانس $f \approx 13.57 THz$ است، یعنی وقتی فرکانس موج زنش به فرکانسهای موثر پلاسمون نانو پلازما نزدیک می‌شود.

کلید واژه- تولید تابش تراهرتز، نانو پلازما، نانوخوشه، کانال انرژی الکترواستاتیکی، بازده تابش تراهرتز.

Terahertz radiation via beating Gaussian laser beams and nanocluster plasma

RobabehNematiSiahmazgi, SaedJafari

Department of Physics, University of Guilan, rnemati@phd.guilan.ac.ir, S.Jafari@guilan.ac.ir

Abstract- In this paper, generation of terahertz (THz) radiation by the beating of two super- Gaussian laser beams in a nanocluster plasma is investigated, theoretically. The electric field of laser beams interact with the nanocluster, leads to the ionization of the cluster atoms, and producing nanoplasma. Interaction of laser beams with the electronic clouds of nanoplasma generates ponderomotive force that leads to the creation of a macroscopic electron current at the beat frequency which can generate THz radiation. The THz wave equations and THz efficiency are analytically derived in nanocluster plasma medium. The effects of the density and radius of nanoclusters, the laser beam width and intensity of super- Gaussian lasers on the THz radiation efficiency has been investigated in a nanoplasma- based THz emitter. The results indicated the maximum value of the field amplitude for THz radiation is the near the frequency of $f \approx 13.57 THz$, that is, when the beat- wave frequency approaches the effective plasmon frequencies of the nanoplasma.

Keywords: Generation of Terahertz radiation, Nanoplasma, Nanocluster, Electrostatic energy channel, Efficiency of THz radiation.

آید. با استفاده از پتانسیل اثر گذار $\phi_p = (-m/2e)v_1 \cdot v_2^*$ ما میتوانیم نیروی اثرگذار حاصل از تعامل لیزر - نانوپلازما به شرح زیر به دست می آید.

$$F_p^{NL} = \frac{-e^2 E_0^2 \omega_1 \omega_2}{(\omega_1^2 - \frac{\omega_p^2}{3} + i\nu\omega_1)(\omega_2^2 - \frac{\omega_p^2}{3} - i\nu\omega_2)} \quad (2)$$

$$[-2q \frac{y^{q-1}}{a_0^q} \hat{e}_y + ik \hat{e}_z] \exp(-2(\frac{y}{a_0})^q) e^{i(kz - \omega t)} + c.c.,$$

بنابراین، سرعت غیرخطی الکترون، که در نتیجهی نیروی اثرگذار است به صورت زیر به دست می آید

$$v_p^{NL} = \frac{i\omega F_p^{NL}}{m(\omega^2 - \frac{\omega_p^2}{3} + i\nu\omega)}, \quad (3)$$

چگالی جریان غیرخطی، که وظیفه تولید تابش THz را برعهده دارد، با استفاده از $J^{NL} = -n_a e v^{NL}/2$ محاسبه می-شود. با قرار دادن معادلهی (۳) در معادله مربوط به چگالی جریان غیرخطی و با در نظر گرفتن $n_a = 4\pi n_c^3 n_e / 3$ چگالی جریان غیرخطی به شرح زیر نوشته می شود

$$J^{NL} = \frac{\frac{in}{c} r_c^3 e E_0^2}{12m(\omega^2 - \frac{p}{3} + i\nu\omega)} \frac{\omega_p^2 \omega \omega_1 \omega_2}{(\omega_1^2 - \frac{\omega_p^2}{3} + i\nu\omega_1)(\omega_2^2 - \frac{\omega_p^2}{3} - i\nu\omega_2)} \quad (4)$$

$$[-2q \frac{y^{q-1}}{a_0^q} \hat{e}_y + ik \hat{e}_z] \exp(-2(\frac{y}{a_0})^q) e^{i(kz - \omega t)} + c.c.,$$

انتشار امواج تراهرتز را می توان با استفاده از معادلات حاکم

$$\text{برمعادلات ماکسول } \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{i4\pi\omega}{c^2} \mathbf{J}^{NL} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon \mathbf{E},$$

به دست آورد. در اینجا گذردهی $\epsilon = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\nu\omega - \omega_p^2/3)$ پلازما نانوخوشه است. با فرض تغییرات فاز سریع برای میدان الکتريکی، و

مقدمه

در سالهای اخیر، تولید تابش تراهرتز (THz) توسط نانوخوشه ها، کامپوزیتهایی در ابعاد نانو و نانولوله به واسطهی اندازهی بسیار جمع و جور (ابعادنانو) و کارایی منابع تابش THz برای توسعه وسایل نوری و آنتن THz مورد توجه بوده است. تابشهای تراهرتز دارای کاربردهای بالقوه در ارتباطات بیسیم، تصویربرداری پزشکی، طیفسنجی، علوم پزشکی، نجوم و غیره است. طیف تابش THz مربوط به ناحیهی بین باند مادون قرمز و امواج مایکروویو از طیف الکترومغناطیسی است [۱-۳].

تابش تراهرتز

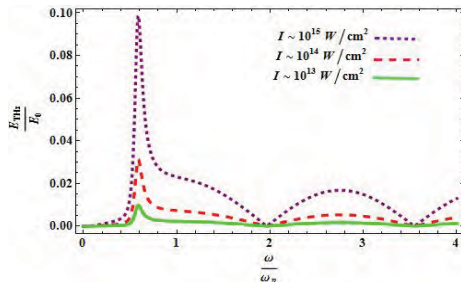
ما یک هدف خوشه را با چگالی n_c و شعاع خوشه های اتمی در که تحت تابش دو باریکهی لیزر فوق العاده گاوسی با فرکانس ω_1 و ω_2 ، و عدد موج k_1 و k_2 که جهت انتشار آنها z و جهت قطبش آنها در جهت y قرار دارند، یعنی به صورت $\mathbf{E}_j = E_0 \exp[-(\frac{y}{a_0})^q] e^{i(k_j z - \omega t)} \hat{e}_y + c.c.$ نظر می گیریم. در اینجا a_0 عرض باریکه، $j = 1, 2$ و $q \geq 2$ شاخص باریکهی لیزر فوق گاوسی است.

نیروی یکه بر روی الکترونهای خوشه (یا به عبارتی بر نانو ذرات کروی در خوشه ها) وارد می شود عبارت است از مقدار جابجایی ابرالکترونی نسبت به یون ها، نیروی لورنتس و نیروی برخورد است. بنابراین می توان معادله حرکت اندرکنش ابرالکترونیکی الکترونز نانوذره را با میدان الکتريکی پرتولیزرژام به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dv_j}{dt} = -\frac{e}{m} \mathbf{E}_j - \frac{\omega_p^2}{3} \mathbf{r}_j - \nu v_j \quad (1)$$

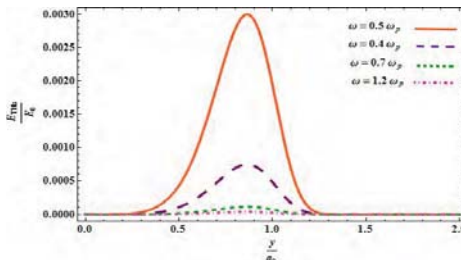
که m ، $\omega_p = (4\pi e^2 n_0 / m)^{1/2}$ ، و ν به ترتیب، جرم الکترون، فرکانس پلازما، و فرکانس برخورد الکترون و یون است. با حل معادلهی (۱) نوسانات الکترون \mathbf{r}_j و v_j به دست می-

های زاویه ای ($\lambda_1 = 9.91 \mu m$) $\omega_1 = 1.9 \times 10^{14} rad/s$ و $\omega_2 = 1.8 \times 10^{14} rad/s$ ($\lambda_2 = 10.4 \mu m$) را در نظر می گیریم که به ترتیب می توان از لیزرهای گازی CO2 و لیزر N2O بدست آورد. شعاع نانو خوشه $r_c = 2 \times 10^{-6} cm$ و چگالی نانو خوشه $n_c = 5 \times 10^{14} cm^{-3}$ ، فرکانس پلاسما ($\omega_p = 1.5 \times 10^{14} rad/s$) (که متناظر با چگالی پلاسما الکترون $n = 6.37 \times 10^{28} cm^{-3}$ است) و فرکانس برخورد $n = 6.37 \times 10^{28} cm^{-3}$ در نظر گرفته می شوند.



شکل ۱: میدانتابشتراهرتز نرمالیزه بر حسب تابعیاز فرکانس تراهرتز نرمالیزه برای شدتهای مختلف با $q = 2$ و $r_c = 2 \times 10^{-6} cm$ ، $n_c = 5 \times 10^{14} cm^{-3}$

شکل ۱ تغییرات میدان نرمالیزه تابش THz را بر حسب تابعی از فرکانس THz نرمالیزه برای مقادیر مختلف شدت لیزر نشان می دهد. در این شکل، مشاهده می شود که با افزایش شدت لیزر، میدان نرمال شده تابش THz افزایش می یابد.



شکل ۲: میدانتابشتراهرتز نرمالیزه بر حسب تابعیاز فاصله عرضیاز محور Z در فرکانسهای مختلف $\omega = 0.5\omega_p, 0.7\omega_p, 0.5\omega_p$ و $1.2\omega_p$ وقتی $q = 6$

شکل ۲، تغییرات میدان نرمالیزه تابش THz را بر حسب تابعی از فاصله عرضی از محور Z برای فرکانسهای مختلف THz نرمال ترسیم می کنیم. واضح است که وقتی فرکانس THz برابر با آن $\omega = 0.5\omega_p$ باشد، نزدیک به

فرض اینکه میدان الکتریکی به شکل یک موج عرضی، با جبهه‌ی موج تخت بینهایت باشد، پس مولفه‌ی y رابطه‌ی را می توان به صورت زیر به دست آورد

$$[-2ik \frac{dE_{T0y}}{dz} + (k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon) E_{T0y}] e^{i(kz - \omega t)} = \frac{4i\pi\omega}{c^2} \mathbf{J}^{NL}, \quad (5)$$

و میدان الکتریکی تراهرتز به صورت زیر به دست می آید. و بازده تابش تراهرتز نیز به صورت زیر به دست می آید

$$\eta = \frac{W_{THz}}{W_{Beam}} = \frac{\pi^2 r_c^6 n_c^2 e^2 z^2 q^2}{3m^2 c^4 k^2 a_0^2 2^3 - \frac{1}{q} ((\omega^2 - \frac{p}{3})^2 + \omega^2 v^2)} \frac{\omega^4 \omega_1^4 \omega_2^2}{\Gamma(2 - \frac{1}{q})} \frac{\Gamma(\frac{1}{q})}{((\omega_1^2 - \frac{p}{3})^2 + \omega_1^2 v^2)((\omega_2^2 - \frac{p}{3})^2 + \omega_2^2 v^2)} \quad (6)$$

از طرف دیگر با در نظر گرفتن جمله یاولدر معادله ماکسول ($\nabla \cdot \mathbf{E} \neq 0$) معروف به کانال انرژی الکترواستاتیک، می توان معادله را حل کرد. با در نظر گرفتن دیورژانس از دو طرف معادله مربوط به ماکسول، $\mathbf{E} = -\frac{4i\pi}{\omega\epsilon} \mathbf{J}^{NL}$ به دست می آید. میدان الکتریکی تراهرتز را در این حالت به صورت زیر به دست آوریم

$$E_{THz} = \frac{-2\pi\alpha}{k} [\frac{\omega}{c^2} 2q \frac{y^{q-1}}{a_0^q} + \frac{1}{\omega\epsilon} (2q(q-1)(q-2) \frac{y^{q-3}}{a_0^q} - 12q^2 (q-1) \frac{y^{2q-3}}{a_0^{2q}} + (2q \frac{y^{q-1}}{a_0^q})^3) \exp[-\frac{2y^q}{a_0^q}]]. \quad (7)$$

تحلیل عددی

تولید تابش THz را در برهمکنش پرتوهای لیزر با پلاسما نانوساختار برخوردی به صورت عددی بررسی می کنیم. ما اثرات چگالی و شعاع نانو خوشه ها، عرض پرتو و شدت کارایی لیزر فوق گاوسی تابش THz را بررسی می کنیم. در این بخش، ما لیزرهای فوق گاوسی با فرکانس

شکل ۴ بازده تولید تابش THz را برحسب تابعی از فرکانس THz نرمالیزه نشان می‌دهد. علاوه بر این، در شکل ۵، بازده تولید تابش THz را برحسب تابعی از فرکانس THz نرمالیزه برای شعاع‌های مختلف نانوساختار رسم می‌کنیم. مشخص شده است که با افزایش شعاع نانوساختار، بازده تابش THz افزایش مییابد

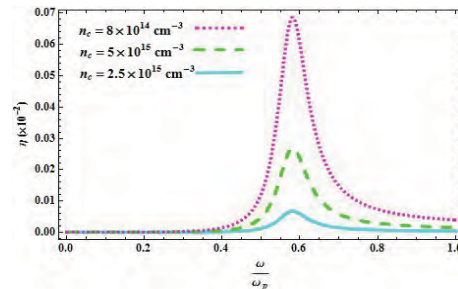
نتیجه‌گیری

در این مقاله، تولید تابش THz حاصل از زنش دو پرتوی لیزر فوق‌گوسی در یک نانوپلاسمای برخوردی بررسی شده است. وابستگی تولید تابش THz به تراکم و شعاع پلاسمای نانوساختار، شدت و شاخص پرتوهای لیزر گوسی برای دو مورد مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات عددی نشان داده‌اند که بهترین وضعیتی که می‌توان تابش THz را بدست آورد، در فرکانس $\omega = \omega_p/3 \approx 0.56\omega_p$ اتفاق می‌افتد. حداکثر دامنه میدان برای تابش THz تولید شده، فرکانس نزدیک به $f \approx 13.57\text{THz}$ است، یعنی وقتی فرکانس موج زنش به فرکانسهای موثر پلاسمون پلاسمای نانوساختار نزدیک می‌شود، تشدید رخ می‌دهد. علاوه بر این، مطالعات نشان داده است که با افزایش شدت لیزر فوق‌العاده گوسی در تعامل با نانوذرات با چگالی بالاتر و اندازه بزرگ (شعاع بزرگتر) می‌توان بازده بهتر تابش THz را با فرکانس حدود 13.57THz به دست آورد.

مراجع

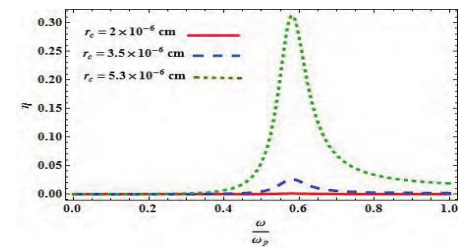
- [1] E. Pickwell and V. P. Wallace, J. Phys. D. **39**, R301-R310, 2006.
- [2] E. Matsubara, M. Nagai, and M. Ashida, J. Opt. Soc. Am. B, **30**, 2013.
- [3] A. V. Balakin, M. S. Dzhidzhoev, V. M. Gordienko, M. N. Esaulkov, I. A. Zhvaniya, K. A. Ivanov, I. A. Kotelnikov, N. A. Kuzechkin, I. A. Ozheredov, V. Y. Panchenko, IEEE Trans. THz Sci. Technol. **7**, 70-79, 2016.

است، $\omega = \omega_p/\sqrt{3} \approx 0.57\omega_p$ دامنه تابش نرمال THz دارای ماکزیمم مقادیر است. در واقع، زمانی که تشدید اتفاق می‌افتد فرکانس موج زنش به فرکانسهای موثر پلاسمون پلاسمای نانوساختار نزدیک شود، و حداکثر دامنه میدان تابشی THz را بدست می‌آورد.

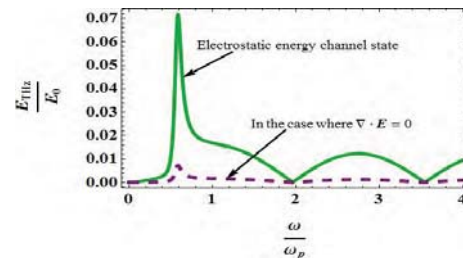


شکل ۳: بازده تابش تراهرتز نرمالیزه بر حسب تابعی از فرکانس تراهرتز نرمالیزه برای چگالیهای مختلف خوشه.

در شکل ۳، میدان تابشی نرمالیزه THz را به عنوان برحسب تابعی از فرکانس THz نرمالیزه برای پرتوهای لیزر گوسی و فوق‌گوسی رسم می‌کنیم.



شکل ۴: بازده تابش تراهرتز نرمالیزه بر حسب تابعی از فرکانس تراهرتز نرمالیزه برای شعاعهای مختلف خوشه.



شکل ۵: تابش نرمالیزه میدان THz بر حسب تابعی از فرکانس نرمالیزه THz برای لیزر سوپر گوسی در $q = 4$ دو مورد: حالت کانال انرژی الکتروستاتیکی $\nabla \cdot \mathbf{E} \neq 0$ ، و حالت $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ با

$$a_0 = 0.005\text{mm} \text{ و } y = 0.5a_0$$