بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

شبیه سازی عددی تاثیر فشار و نوع گاز زمینه بر بازده تولید امواج تراهرتز

سمیه مهرابیان

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

چکیده - امواج تراهرتز در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۱ تا *THz* ۳۰، دارای کاربردهای فراوانی در اسپکتروسکوپی، زیست شناسی و علوم پزشکی، تصویربرداری و فناوری اطلاعات می‌باشند. لذا در این تحقیق، به بررسیِ تولید امواج تراهرتز با استفاده از برهمکنش پالس لیزرِ فمتو ثانیه و هارمونیک دوم آن با گاز، پرداخته می‌شود و تاثیر عواملی چون فاز اولیه‌ی پالس لیزر، اختلاف فاز بین پالس لیزر و هارمونیک دوم آن، نوع گاز زمینه و فشار آن بر بازده تولید این امواج مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش فشار گازِ زمینه، کاهش انرژی یونیزاسیونِ آن، افزایش اختلاف فاز بین دو پالس لیزر و نیز افزایش فاز اولیه‌ی پالس، منجر به بازده بیشتر تولید امواج تراهرتز می‌گردد.

کلید واژه- امواج تراهرتز، برهمکنش لیزر-گاز، جریان الکترونی

Numerical Investigation of the Effects of the Background Gas Type and its Pressure on the THz generation efficiency

Somayeh Mehrabian

Physics Department, Shahrood University of Technology, Shahrood

Abstract- The electromagnetic pulses in the terahertz spectral range (0.1-30 THz) have numerous applications in spectroscopy, biology and medicine, T-ray imaging and information technology. Therefore, in this paper, the THz generation due to the interaction of a femtosecond laser pulse and its second harmonic with a background gas is studied. In addition, the effects of the laser pulse initial phase, phase difference of the laser pulse and its second harmonic, the background gas type and its pressure on the generated THz field are investigated. The results show that the THz generation efficiency is increased with the increment of the background gas pressure and the decrement of its ionization potential. Moreover, increment of the pulse initial phase, and also the phase difference lead to the same result.

Keywords: THz electromagnetic pulses, Laser-gas interaction, Electron current

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

امواج تراهرتز در محدوده‌ی فرکانسی ۰/۱ تا ۳۰ THz، دارای کاربردهای فراوانی در اسپکتروسکوپی، زیست شناسی، تصویربرداری، اندازه‌گیری‌های غیرمخرب، کنترل کیفیت محصولات غذایی و محاسبات فوق سریع هستند [۱]. اما امواج تراهرتز با شدت بالا تنها در شتابدهنده‌های بزرگ تولید می‌شوند، این در حالی است که در ساخت منابع تراهرتز در مقیاس کوچک (رومیزی)، پیشرفت زیادی حاصل نشده است. اساس کار این منابع، که عموماً دارای بازده پایین و محدودیت در پهنای باند تولید شده می‌باشند، بر optical rectification در کریستال های غیرخطی استوار است [۲]. در این میان، یونیزاسیون القایی لیزری در میدانهای لیزری نامتقارن، که با متمرکز کردن یک پالس و هارمونیک دوم آن در گاز ایجاد می‌گردد، روش ثانویه ای است که منجر به تولید امواج THz با شدت بالا و پهنای باند زیاد می‌شود [۲]. لازم بذکر است که این روش با عنوان "تولید امواج تراهرتز با استفاده از برهمکنش گاز-پلاسما[۱]"، شناخته می‌شود.

دو مکانیزم اساسیِ پذیرفتاری غیرخطی مرتبه‌ی سوم ($\chi^{(3)}$) و جریانِ الکترونیِ عرضی برای توجیه فرایند تولید امواج تراهرتز در برهمکنش گاز-پلاسما وجود دارد که در این میان نظریه دوم از طرفداران بیشتری برخوردار است. [۵-۳]. از اینرو، در این تحقیق، با استفاده از مدل جریان الکترونیِ عرضی که در اثر متمرکز کردن پالس لیزر و یونیزاسیون گاز اتفاق می‌افتد، به بررسیِ بستگیِ بازده تولید امواج تراهرتز به فاز اولیه‌ی پالس لیزر، اختلاف فاز بین پالس لیزر و هارمونیک دوم آن، نوع گاز زمینه و فشار آن می‌پردازیم. لازم به یادآوری است که نتایج بدست آمده از اهمیت زیادی در آزمایشات تجربی، به منظور افزایشِ بازده تولید این امواج، برخوردار است.

۱-۱- مدل ریاضی

میدان الکتریکی یک پالس لیزر فمتوثانیه در ۸۰۰ nm به همراه هارمونیک دوم آن در ۴۰۰ nm، که با متمرکز شدن در یک گاز منجر به فوتویونیزاسیون[۲] آن می‌شود، عبارت است از:

$$E=[E_1\cos(\omega_1 t+\phi)+E_2\cos(2(\omega_1 t+\phi)+\theta)]\exp\left(-(t-t_0)^2/\tau^2\right) \quad (۱)$$

که در اینجا، θ اختلاف فاز بین دو پالس لیزر و ϕ فاز اولیه پالس لیزر است. پارامتر کلدیش[۳] ($\gamma=\sqrt{(\varepsilon_i c\varepsilon_0 m_e\omega^2/\mathrm{I}_0 e^2}$) که در آن، m_e، c، ε_i، ε_0، ω، e و I_0 به ترتیب برابر با جرم الکترون، سرعت نور، انرژیِ یونیزاسیون گاز، گذردهی خلا، فرکانس لیزر، بار الکترون و شدت لیزر می‌باشند؛ گذار بین یونیزاسیون چند فوتونی[۴] و یونیزاسیون تونل‌زنی[۵] را توصیف می‌کند. در صورتی‌که $\gamma<1$ باشد، یونیزاسیون از نوع تونل‌زنی است که به ازای $I>10^{14}W/cm^2$ اتفاق می‌افتد. در این حالت، آهنگ یونیزاسیون با استفاده از روش ADK[۶] قابل محاسبه است [۴].

$$W_{ADK}=\frac{\omega_{at}}{2}C_{n^*}^2\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_h}\frac{(2l+1)(l+|m|)!}{2^{|m|}(|m|)!(l-|m|)!}\left[2\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_h}\right)^{1.5}\frac{E_{at}}{E_L}\right]^{2n^*-|m|-1}\exp\left[-1.5\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_h}\right)^{1.5}\frac{E_{at}}{E_L}\right] \quad (۲)$$

که در آن، $C_{n^*}^2=\frac{2^{2n^*}}{n^*\Gamma(n^*+l^*+1)\Gamma(n^*-l^*)}$، l، m، $n^*=Z\sqrt{\varepsilon_h/\varepsilon_i}$، اعداد کوانتومیِ اربیتالی، مغناطیسی و اصلیِ موثر بوده و $l^*=n_0{}^*-1$ عدد کوانتومی اربیتالی موثر است. ω_{at}، E_{at}، ε_h و E_L نیز به ترتیب عبارتند از فرکانس و میدان الکتریکی در یکای اتمی، انرژی یونیزاسیون اتم هیدروژن و میدان الکتریکی پالس لیزر.

جهت انجام محاسبات، میدان الکتریکی پالس لیزر با استفاده از رابطه‌ی (۱) در هر زمان محاسبه شده و با استفاده از آن، نرخ یونیزاسیون مشخص می‌گردد. سپس با استفاده از این نرخ، چگالیِ الکترون‌ها را محاسبه نموده و سپس حرکت آنها را تحت میدان الکتریکی پالس لیزر بررسی می‌نماییم. از آنجاییکه میدان الکتریکی بر جهت انتشار عمود است،

[۱] Gas-plasma THz generation
[۲] Photoionization
[۳] Keldysh adiabaticity parameter
[۴] Multiphoton ionization
[۵] Tunneling ionization
[۶] Ammosov – Delone – Krainov approach

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

الکترون‌ها در طول زمانیِ پالس لیزر، حرکت عرضی‌ای را در جهت عمود بر راستای انتشار تجربه خواهند کرد که جریان عرضیِ خالصِ ناشی از آن در هر دوره‌ی تناوب، سبب ایجاد یک چگالیِ جریان عرضی متغیر با زمان در بازه‌یِ زمانی پالس لیزر می‌شود. این جریان متغیر با زمان سبب تولید امواج تراهرتز در میدان دور است. جریان عرضی مذکور از رابطه‌ی [۳-۴]

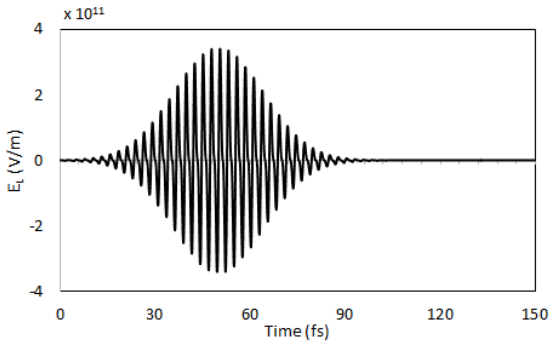
$$J_{\perp}(t)=\int_0^t ev_e(t,t')N_e(t')dt' \qquad (۳)$$

محاسبه می‌شود که در آن $v_e(t,t')$ سرعت الکترونی است که در زمان t' به وجود آمده است. میدان تراهرتز تولیدی نیز متناسب با $dJ_{\perp}/dt$ خواهد بود.

در نهایت، پس از محاسبه‌ی بستگی زمانی میدان الکتریکی پالس لیزر، چگالی الکترونی، سرعت الکترون‌ها، چگالی جریان عرضی و میدان الکتریکیِ تراهرتز تولیدی، به بررسی اثر زوایای ϕ، θ، نوع گاز زمینه و فشار آن بر دامنه‌ی موج تراهرتز تولیدی پرداخته می‌شود.

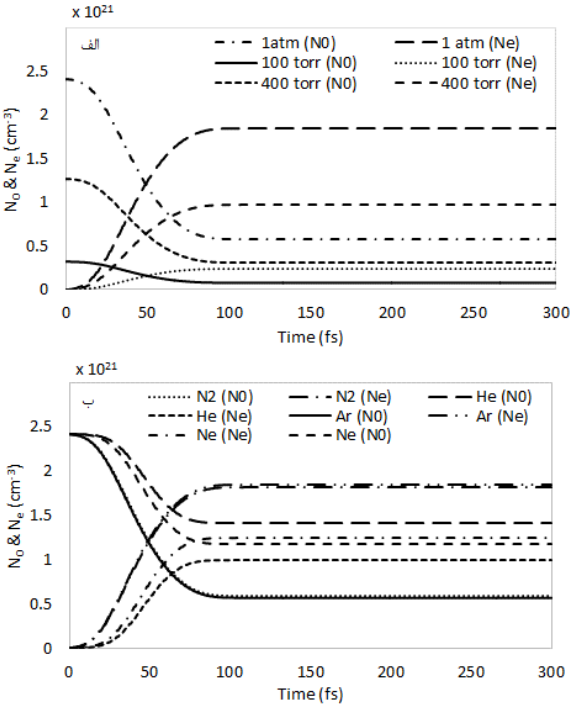
۲-۱- نتایج

میدان الکتریکیِ ناشی از برهمنهیِ دو پالس لیزر در شکل ۱ به نمایش در آمده است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود طول زمانی پالس برابر با fs ۱۰۰ است.



شکل ۱: توزیع زمانی میدان الکتریکیِ ناشی از برهمنهیِ دو پالس لیزر

چگالیِ الکترونی و چگالیِ گاز زمینه بر حسب زمان در گاز زمینه‌ی نیتروژن و به ازای فشارهای مختلف در شکل ۲ (الف) و توزیع زمانیِ این دو کمیت به ازای گازهای متفاوت در فشار atm ۱ در شکل ۲ (ب) دیده می‌شود. همان‌گونه که دیده می‌گردد توزیع زمانیِ چگالیِ الکترونی و چگالیِ گاز زمینه دارای روندی عکس یکدیگرند.



شکل ۲: توزیع زمانی چگالیِ الکترونی (N_e) و چگالیِ گاز زمینه (N_0) بر حسب زمان (الف) به ازای فشارهای مختلف گاز نیتروژن و (ب) به ازای گازهای زمینه‌ی متفاوت در فشار atm ۱

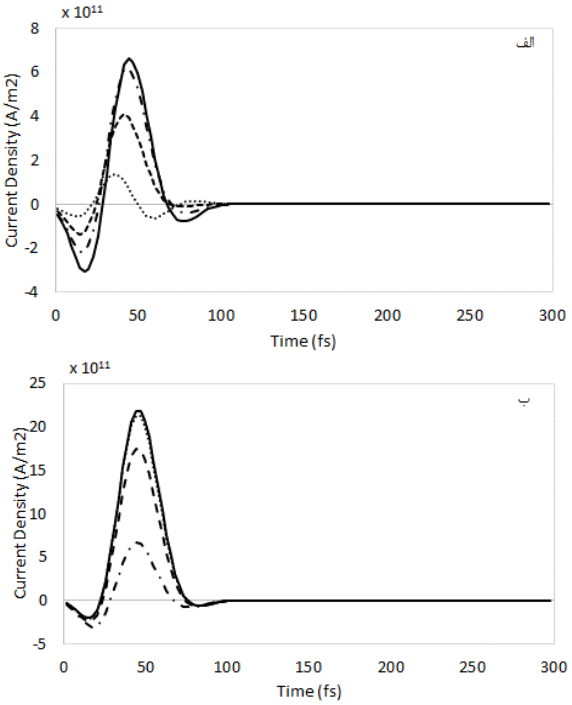
بدین معنا که با افزایش چگالیِ الکترونی، چگالیِ گاز زمینه کاهش می‌یابد، تا جمع آن‌ها در زمان برابر مقداری ثابت باشد که این مقدار ثابت همان چگالیِ اولیه‌ی گاز زمینه است. علاوه بر اینکه میزان چگالیِ الکترونی با افزایش فشار افزایش می‌یابد که این مسئله، بدلیل چگالی بیشترِ خنثی‌ها در فشار بالاتر است. نیز چگالی الکترونی با کاهش انرژی یونیزاسیون از هلیوم به نئون، افزایش یافته و برای دو گاز آرگون و نیتروژن به دلیل مساوی بودن انرژی یونیزاسیون آن‌ها، تقریباً برابر است.

جهت بررسیِ تاثیر فاز اولیه‌ی (ϕ) و اختلاف فاز (θ)، توزیع زمانیِ جریان عرضیِ خالصِ به ازای اختلاف فازهای مختلف در فازِ اولیه‌ی ثابت و نیز به ازای فازهای اولیه‌ی متفاوت در اختلاف فاز ثابت، در شکل ۳ به نمایش درآمده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش اختلاف فاز، بدلیل افزایش عدم تقارن در میدان الکتریکیِ پالس لیزر، جریان عرضیِ خالص افزایش می‌یابد و فاز اولیه نیز با تاثیر بر سرعت اولیه‌ی الکترون‌های تولید شده، سبب افزایش جریان خالص ایجاد شده می‌شود. توزیع زمانیِ میدان تراهرتز تولیدی برحسب پارامترهای یاد شده در شکل ۴ به نمایش درآمده است. مطابق انتظار، میدان تراهرتز، روندی همچون چگالیِ الکترونی و چگالی جریان را دنبال خواهد کرد؛ زیرا مشتق زمانیِ چگالیِ

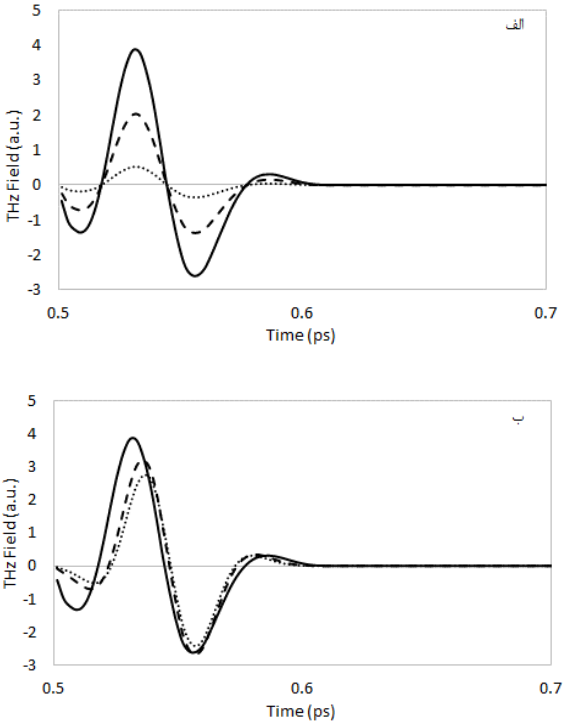
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

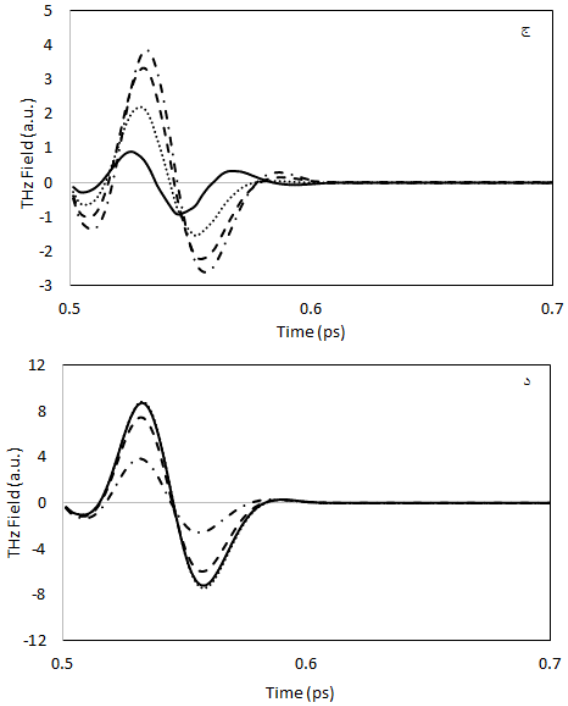
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

جریان است که میدان تراهرتز را بدست می‌دهد.



شکل ۳: توزیع زمانی چگالیِ جریان عرضیِ خالص (الف) به ازای اختلاف فازهای ۰ (نقطه‌چین)، ۳۰ (خط‌چین)، ۶۰ (خط‌نقطه) و ۹۰° (خط توپر) در فاز اولیه‌ی ثابت صفر و (ب) به ازای فازهای اولیه‌ی ۰ (خط‌نقطه)، ۳۰ (خط‌چین)، ۶۰ (نقطه‌چین) و ۹۰° (خط توپر) در اختلاف فاز ثابت ۹۰°





شکل ۴: میدان تراهرتز (الف) در فشار ۱۰۰ (نقطه‌چین) و ۴۰۰ *torr* (خط‌چین) و ۱ *atm* (خط توپر) در گاز نیتروژن ؛ (ب) در گازهای زمینه‌ی هلیوم (نقطه‌چین)، نئون (خط‌چین) و آرگون (خط توپر) در فشار ۱ *atm*؛ (ج) به ازای اختلاف فازهای ۰ (خط توپر)، ۳۰ (نقطه‌چین)، ۶۰ (خط-چین) و ۹۰° (خط‌نقطه) در فاز اولیه‌ی صفر و (د) به ازای فازهای اولیه‌ی ۰ (خط نقطه)، ۳۰ (خط چین)، ۶۰ (خط توپر) و ۹۰° (نقطه‌چین) در اختلاف فاز ۹۰°

۲- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسیِ میدان تراهرتز تولید شده با استفاده از برهمکنش گاز-پلاسما پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش فشار گازِ زمینه و کاهش انرژی یونیزاسیونِ آن، افزایش اختلاف فاز بین دو پالس لیزر و نیز افزایش فاز اولیه‌ی پالس، منجر به بازده بیشتر تولید امواج تراهرتز می-گردد.

مراجع.

[1] M. Tonouchi, Nature Photonics Vol. 1, pp. 97-105, 2007.
[2] M. Clerici, M. Peccianti, B. E. Schmidt, L. Caspani, M . Shalaby, M. Gigue`re, A. Lotti, A. Couairon, F. Le´gare´, T . Ozaki, D. Faccio, R. Morandotti, PRL Vol. 110, pp. 253901(1-5), 2013.
[3] K. Y. Kim, J. H. Glownia, A. J. Taylor, G. Rodriguez, Optics express Vol. 15, pp. 4577-4584, 2007.
[4] K. Y. Kim, A. J. Taylor, J. H. Glownia, G. Rodriguez, Nature Photonics Vol. 2, pp. 605-609, 2008.
[5] J. Peñano, P. Sprangle, B. Hafizi, D. Gordon, P. Serafim, Phys. Rev. E Vol. 81, pp. 026407(1-8), 2010.
S.C. Rae, and K. Burnett, Phys. Rev. A Vol. 46, pp. 1084-1090, 1992.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]