Review Paper

Terahertz Generation via Two-Color Laser Pulses[1]

Zoha Ameri[2]

Received: 2020.07.30
Revised: 2020.10.14
Accepted: 2020.12.20

Abstract
This paper is a review on Terahertz generation, based on a method called "Two-Color Laser Pulses", in which terahertz pulse is generated by focusing a pulse and its second harmonic into gas target at the same time, in the output. Terahertz generation set up, physical processes involved in terahertz generation in this method and the most acceptable reason for the amplification of terahertz pulse in this process is discussed. Also, the role of phase difference between the laser pulse and its second harmonic for generated pulse is reviewed. At last, generated THz amplitude based on different phases between the two amplitudes is surveyed. Nonlinear crystal is used in this generation method and the method of generation is a nonlinear process. Therefore, the role of nonlinear crystal in the process of Terahertz pulse generation, its position in optical set-up and the advantage of using it, are pointed out.
Keywords: *Terahertz Generation, Two-color Laser Pulses, Terahertz Amplification*.

[1] DOI: 10.22051/ijap.2020.32461.1167
[2] M.Sc. Student, Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Email: z.amerimahabadi@mail.sbu.ac.ir

فصلنامهٔ علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا
سال دهم، پیاپی ۲۱، تابستان ۱۳۹۹

مقالهٔ ترویجی

تولید تراهرتز از پالس لیزر دورنگ[1]

ضحی عامری[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰

چکیده

این مقاله مروری است بر تولید تراهرتز بر اساس روشی موسوم به "پالس لیزر دورنگ" که در آن از طریق متمرکز کردن پالس و هماهنگ دوم آن به طور همزمان در نمونهٔ گازی در خروجی، پالس تراهرتز تولید می‌شود. چیدمان تولید تراهرتز در این روش و فرایندهای فیزیکی دخیل در تولید و مقبول‌ترین دلیل برای تقویت پالس تراهرتز تولیدی ذکر شده است. همچنین، نقش اختلاف فاز بین پالس اصلی و هماهنگ دوم در پالس خروجی بررسی شده است. در بخش انتهایی مقاله به دامنهٔ تراهرتز تولیدشده به ازای اختلاف فازهای مختلف بین دو دامنه پرداخته شده است. در این روش تولید، از بلور غیرخطی استفاده می‌کنیم و فرایند تولید فرایندی غیرخطی است. در نتیجه، به نقش بلور غیرخطی در فرایند تولید پالس تراهرتز، جایگاه آن در چیدمان اپتیکی و مزیت استفاده از آن نیز اشاره شده است.

واژگان کلیدی: *تولید تراهرتز، پالس لیزر دورنگ، تقویت تراهرتز.*

---

[1] DOI: 10.22051/ijap.2020.32461.1167

[2] دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکدهٔ لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
z.amerimahabadi@mail.sbu.ac.ir

۱. مقدمه

تراهرتز بازه‌ای از طیف بسامدی در THz [۱۰-۰٫۱] و طول موج μ۳۰m تا ۳mm است. تراهرتز در عین آنکه قدرت نفوذ شدیدی دارد، انرژی فوتون‌های آن در حدی نیست که قدرت یونیزه کردن مواد را داشته باشد و به دلیل این ویژگی، کاربردهای مختلفی از جمله تصویربرداری [۱] و کنترل کیفیت [۲] و شناسایی مواد شیمیایی دارد. همچنین، از آنجا که آب جاذب تراهرتز است، می‌توان از آن برای بررسی میزان آب اعضای بدن و کاربردهای پزشکی استفاده کرد [۱].

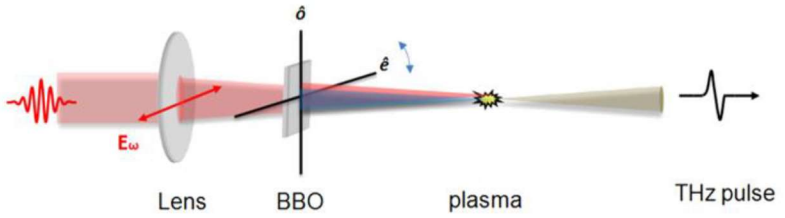
بخش ابتدایی مقاله به توصیف بازهٔ تراهرتز، ویژگی‌های منحصربه‌فرد و کاربردی آن می‌پردازد. از آنجا که، تراهرتز کاربردهای فراوانی دارد، به صورت خلاصه خواننده را با بعضی کاربردهای آن آشنا خواهیم کرد.

تولید تراهرتز از برهم‌کنش لیزر و پلاسما اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط همستر [۳] مشاهده شد. در این روش با متمرکز کردن لیزر با توان 10^{12} W و طول 10^{-13} s بر هدف گازی، دیدند که از پلاسمای حاصل پالس تراهرتز تولید می‌شود. برپایهٔ مشاهدات ایشان و با ایجاد تغییرات گوناگون سایر افراد به تولید تراهرتز با قلهٔ بیشتری دست یافتند. لافلر [۴] در سال ۲۰۰۰ در یافت که با اعمال بایاس خارجی بر ناحیهٔ برهم‌کنش می‌تواند تراهرتزی با دامنهٔ قلهٔ ۱۰ برابر به دست آورد. در همان سال، کوک [۵] و همکارش با ایدهٔ تاباندن همزمان لیزر و هماهنگ دوم به گاز، مشاهده کردند که تراهرتز تولیدشده توان بیشتری از حالتی دارد که تنها از یک لیزر استفاده می‌شود. در ادامه، برای متمرکز کردن همزمان پالس اصلی و هماهنگ دوم آن به این فکر افتادند که با تولید هماهنگ دوم با استفاده از یک بلور غیرخطی فرایند برهم‌نهی و تولید پلاسما را تسهیل و تقویت کنند. در سال ۲۰۰۶ کرب و همکارانش [۶] با ایدهٔ استفاده از پالس چندچرخه (با طول کمتر از fs ۱۰) توانستند به پالس تراهرتز با قلهٔ مناسب دست یابند. در بین روش‌های مذکور، روش کوک و همکارش که به "تولید تراهرتز از پالس لیزر دورنگ" شهرت یافته است، بیشترین توجه را به خود جلب کرده است. با استفاده از این روش می‌توان پالس تراهرتز شدید و پهن‌باند و با توان اوج زیاد تولید کرد.

تاریخچهٔ تولید تراهرتز در برهم‌کنش لیزر با پلاسما و فرایند تاریخی که محققان را به روش تولید تراهرتز از پالس لیزر دورنگ هدایت کرد و دلیل برتری این روش در قیاس با سایر روش‌ها نیز ذکر شده است.

۲. روش کار

چیدمان آزمایشگاهی برای تولید تراهرتز از برهم‌نهی لیزر و پالس دوم آن را در شکل ۱ مشاهده می‌کنید.



شکل ۱ چیدمان آزمایشگاهی برای تولید تراهرتز از روش پالس دورنگ (BBO:Beta Barium Borate) [۷].

در این روش ابتدا توسط لنز، پالس لیزر فمتوثانیه را در داخل بلور غیرخطی متمرکز می‌کنند. بعضی بلورهای غیرخطی مانند بتاباریوم بورات توانایی تولید هماهنگ دوم (پالسی با بسامد دو برابر بسامد پالس اصلی) را دارند. از جمله ویژگی‌هایی که این بلورها برای تولید هماهنگ دوم نباید داشته باشند، تقارن وارونگی[1] است، چرا که بلورهایی که تقارن وارونگی دارند نمی‌توانند هیچ هماهنگ زوجی را تولید کنند. در خروجی BBO هماهنگ دوم تولید می‌شود و همراه با هماهنگ اصلی ادامهٔ مسیر را تا متمرکز شدن در گاز می‌پیماید.

در کانون لنز، هماهنگ اول و دوم با یکدیگر ترکیب شده و سبب یونیزه شدن گاز می‌شود. از آنجا که شدت پرتو زیاد است، رژیم حاکم غیراختلالی خواهد بود و لذا یونیزاسیون غیرخطی رخ می‌دهد. از بین یونیزاسیون‌های چند فوتونی، تونل‌زنی و خم‌شدگی کامل سد پتانسیل[2]، یونیزاسیون تونل‌زنی غالب است و در محاسبات لحاظ می‌شود. بر اثر یونیزه شدن گاز، الکترون آزاد تولید می‌شود. این الکترون در ادامه تحت تاثیر میدان اعمالی شروع به نوسان کرده و با سرعتی تحت عنوان سرعت سوق از یون جدا می‌شود و لذا جریان تغییرات اندکی برحسب زمان و در مقیاس زمانی پوش لیزر خواهد داشت، که تغییرات چگالی جریان برحسب زمان سبب تابش می‌شود. اگر طول پالس لیزر کمتر از ۱۰۰fs باشد، تابش حاصل در ناحیهٔ تراهرتز (۰٫۱THz-۱۰) قرار می‌گیرد:

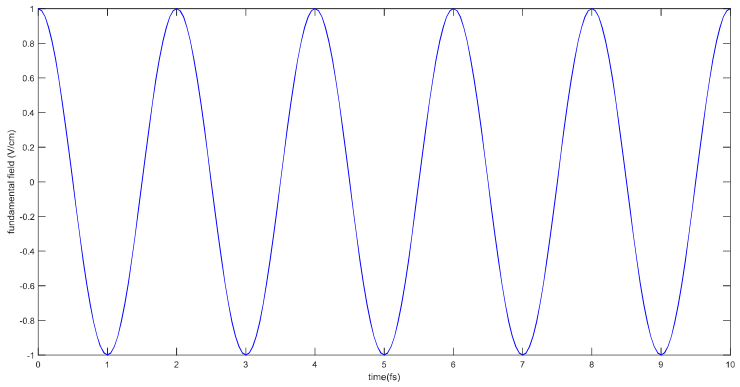
$$E_{THZ} \propto \frac{\partial J}{\partial t} \qquad (۱)$$

[1] Inversion symmetry
[2] Over-the-barrier ionization (OTBI)

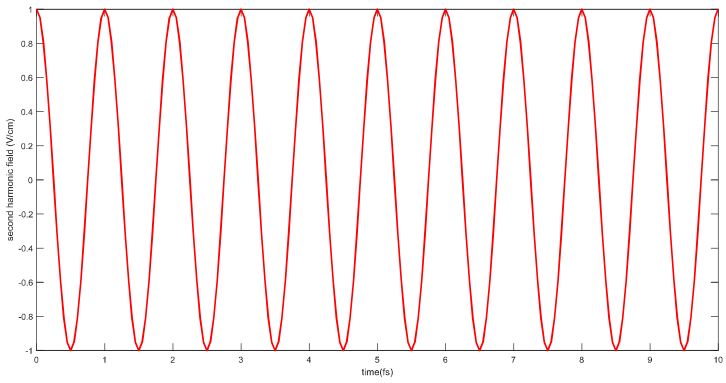
۳. بحث و بررسی

از برخورد لیزر با گاز و تولید پلاسما، تراهرتز تولید می‌شود اما در رابطه با علت تقویت دامنه در استفاده از پالس دورنگ نظریه‌های مختلفی ارائه شده است. مقبول‌ترین علت را کیم و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۷ تحت عنوان میدان تقارن‌شکسته اعلام کردند. طبق تحلیل کیم، در حالتی که بار آزاد تحت میدان لیزر قرار گیرد، به علت تقارنِ میدانْ جهت‌گیری بار در نیم‌چرخهٔ اول و دوم متقارن بوده و جریان کل بسیار ناچیز و صفر می‌شود. اما در حالتی که میدان ترکیبی از دو میدان اصلی و هماهنگ دوم است، دیگر میدان متقارن نیست و در نتیجه، جریان مستقیمی خواهیم داشت که می‌تواند تراهرتز با شدت زیاد تولید کند.

اگر طول موج لیزر اصلی را $\lambda_1 = ۶۰۰nm$ و دامنهٔ میدان آن را $۱\frac{V}{cm}$ در نظر بگیریم، با فرض ثابت ماندن دامنه در تولید هماهنگ دوم، میدان هماهنگ اصلی و دوم به ترتیب به شکل ۲ و ۳ خواهد بود.

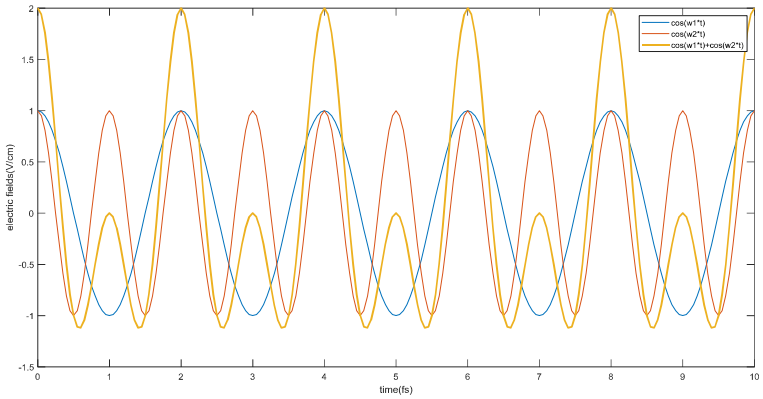


شکل ۲ میدان هماهنگ اصلی با $\lambda_1 = ۶۰۰nm$



شکل ۳ میدان هماهنگ دوم با $\lambda_۲ = ۳۰۰nm$

هر دو میدان به صورت مجزا متقارن هستند و لذا تراهرتز تولیدی از هریک بسیار ضعیف و مانند یک نویز خواهد بود. اما اگر دو میدان با هم ترکیب شوند، میدان حاصل نامتقارن خواهد بود و لذا جریان کل غیرصفر و تراهرتز با شدت بیشتر حاصل می‌شود.



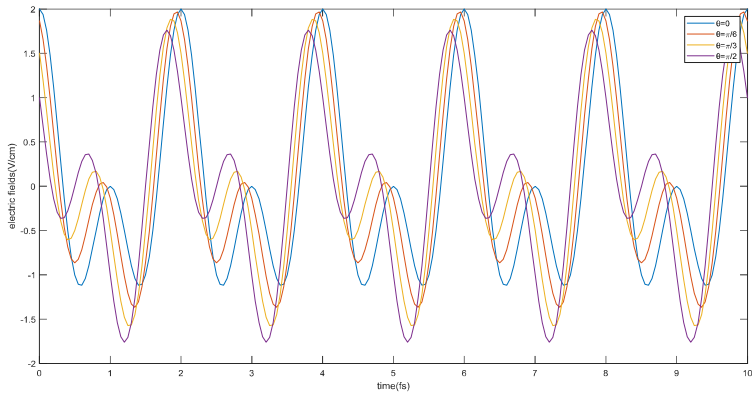
شکل ۴ میدان هماهنگ اول و دوم و میدان حاصل از ترکیب آن‌ها.

در حالت کلی میدان حاصل از رابطهٔ زیر حساب می‌شود:

$$E_L = E_w(t)\cos(wt) + E_{2w}(t)\cos(2wt + \theta) \qquad (۲)$$

که در آن، $E_w(t)$ دامنهٔ میدان اصلی و $E_{2w}(t)$ دامنهٔ هماهنگ دوم و θ اختلاف فاز بین دو دامنه در نقطهٔ کانونی است. میدان حاصل به اختلاف فاز نسبی بین دو دامنه وابسته است.

دامنهٔ حاصل به ازای اختلاف زاویهٔ $\frac{\pi}{۲}$ بیشینه است. در نمودار زیر دامنهٔ حاصل با فرض یکی بودن دامنهٔ هماهنگ اول و دوم و به ازای زوایای $\theta = ۰$ و $\theta = \frac{\pi}{۶}$ و $\theta = \frac{\pi}{۳}$ و $\theta = \frac{\pi}{۲}$ رسم شده است.



شکل ۵ مقایسهٔ میدان حاصل بر اثر چهار اختلاف فاز متفاوت.

دامنهٔ میدان حاصل برای چهار زاویهٔ مذکور به ازای اختلاف فاز ۰ کمینه و به ازای اختلاف فاز $\frac{\pi}{۲}$ بیشینه شده است.

جدول ۱ مقدار تقریبی *دامنهٔ* میدان حاصل به ازای اختلاف فازهای مختلف.

اختلاف فاز دو میدان	دامنهٔ میدان حاصل $(\frac{\mathrm{V}}{cm^2})$
$\theta = ۰$	۳٫۱۰۷
$\theta = \frac{\pi}{۶}$	۳٫۳۳۴
$\theta = \frac{\pi}{۳}$	۳٫۴۵۹
$\theta = \frac{\pi}{۲}$	۳٫۵۲۰

۴. نتیجه‌گیری

تولید تراهرتز از ترکیب پالس اصلی و هماهنگ دوم آن موجب تقویت پالس تراهرتز حاصل می‌شود. تولید هماهنگ دوم با استفاده از بلور غیرخطی علاوه بر آنکه موجب کاهش وسایل مورد استفاده می‌شود، دقت آزمایش را نیز افزایش می‌دهد، چرا که در این روش در خروجی بلور هماهنگ اول و دوم به صورت همزمان داریم و از آنجا که هماهنگ دوم مسیر هماهنگ اول را ادامه می‌دهد، بدون نیاز به لنز ثانویه هر دو در یک زمان در گاز متمرکز می‌شوند. پالس حاصل به اختلاف فاز بین دو پرتو وابسته است و میدان حاصل به ازای اختلاف فاز ۹۰° بیشینه می‌شود. از آنجا که، تراهرتز علاوه بر سایر کاربردهای ذکرشده در شناسایی مواد گوناگون بسیار مفید است، حتی زمانی که ماده در طیف مرئی یکدست به نظر می‌آید، می‌تواند مؤلفه‌های شیمیایی گوناگون آن را تشخیص دهد. بنابراین، شناسایی روش‌های سریع‌تر و دقیق‌تر در تولید آن می‌تواند چاره‌گشای بسیاری از مشکلات باشد.

۵. تقدیر و تشکر

این مقاله نتیجه فعالیت کلاسی درس سمینار دوره کارشناسی ارشد فوتونیک پژوهشکده لیزر و پلاسمای دانشگاه شهید بهشتی است که تحت راهنمایی دکتر مهاجرانی انجام شده است.

منابع

[1] Ferguson B., Zhang X.-C., "Materials for terahertz science and technology", Nature Materials,1,2002.
[2] Sharma V., Arya D., and Jhildiyal M., "Terahertz Technology and Its Applications", in 5th IEEE International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, 2011.
[3] Hamster H., Sullivan A., Gordon S., White W.E., and Falcone R., "Subpicosecond, electromagnetic pulses from intense laser-plasma interaction", Physical Review Letters, 71, 1993.
[4] Loffler T., Jacob F., and Roskos H.G., "Generation of terahertz pulses by photoionization of electrically biased air", APPLIED PHYSICS LETTERS, 77,2000.
[5] Cook D.J., and Hochstrasser R.M., "Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air", OPTICS LETTERS, 25,2000.
[6] Kreß M., Loffler T., Thomson M. D., and Roskos H. G., "Measurement of the Carrier-Envelope Phase of Few-Cycle laser pulses with terahertz-emission spectroscopy", Nature physics, 2, 2006.
[7] Oh T. I., "Intense terahertz generation via two-color laser filamentation", PhD Thesis, The Institute for Research in Electronics and Applied Physics, University of Maryland, Maryland, 2013.
[8] Kim K. Y., Glownia J. H., Taylor A. J., and Rodriguez G., "Terahertz emission from ultrafast ionizing air in symmetry-broken laser fields", OPTICS EXPRESS, 15, 2007.