تولید و آشکارسازی تراهرتز پالسی در برهمکنش لیزر فمتوثانیه با آنتن نوررسانش نیمرسانای GaAs

فاضل جهانگیری، محمد رضایی پندری، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده – نتایج تجربی تولید و آشکارسازی پالس‌های تراهرتز در بازه فرکانسی ۰،۰۱ تا ۰،۹ تراهرتز با به کارگیری آنتن نوررسانش نیمرسانای *GaAs* ارائه و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه، آنتن نیمرسانا تحت تابش پالس‌های لیزری فوق کوتاه به طول زمانی ۸۰ فمتوثانیه، طول موج مرکزی ۱۰۴۰ نانومتر و انرژی چند نانوژول قرار گرفته است که توسط یک سیستم لیزری فمتوثانیه فیبری تامین می‌شود. توزیع زمانی پالس‌های تراهرتز تولید شده که از نسبت سیگنال به نویز بالایی در فرکانس‌های پایینتر برخوردار است، با به کارگیری یک چیدمان پمپ-پراب به صورت تفکیک زمانی شده اندازه گیری و سپس اطلاعات طیفی آن استخراج شده است. این چیدمان قابلیت به کارگیری در طیف سنجی نمونه‌های مختلف در هندسه بازتابی و عبوری را دارا می‌باشد.

کلید واژه- طیف سنجی تراهرتز، فمتوثانیه، لیزر، نوررسانش.

Generation and detection of THz pulses through the interaction of femtosecond laser pulses with GaAs photoconductive antenna

Fazel Jahangiri, Mohammad Rezaei Pandari, Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University

Abstract- The experimental results of generation and detection of Terahertz pulses with frequencies that range between 0.01 and 0.9 THz by utilizing GaAs photoconductive antennas are presented and discussed. The antenna is illuminated by ultrashort laser pulses with duration of 80 femtosecond, wavelength of 1040 nm and energy of a few nJ that are provided by a femtosecond fiber laser system. Temporal shape of the THz electric field has been measured with a high signal to noise ratio at lower parts of the spectrum by employing a time resolved pump-probe setup and then the spectral bandwidth has been extracted. Our setup is suited for spectroscopic measurements in both reflection and transmission configurations.

Keywords: Terahertz spectroscopy, femtosecond, laser, photoconduction.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

گاف فرکانسی تراهرتز تعبیری است که بیش از دو دهه پیش برای معرفی ناحیه‌ای از امواج الکترومغناطیسی با فرکانس ۰٫۳ تا ۱۰ تراهرتز مورد استفاده قرار گرفت تا بیانگر کمتر توسعه یافته بودن این بازه فرکانسی در مقایسه با دیگر نواحی طیف امواج الکترومغناطیسی باشد. اما به دنبال اختراع لیزر، روش‌های مختلفی با به کارگیری باریکه‌های لیزری برای تولید و آشکارسازی تراهرتز توان بالا و پر بازده معرفی و گسترش یافت و باعث افزایش میزان دسترسی محققین به تابش تراهرتز شد. به طوریکه امروزه کاربردهای متنوع و بالقوه تراهرتز بویژه در زمینه-های طیف سنجی و تصویرنگاری تراهرتز در حوزه‌های مختلف صنعت، پزشکی، امنیتی و مطالعه مواد، آنچنان رشد سریعی به خود گرفته است که آن را به یک حوزه فعال دانش و فناوری تبدیل کرده است. از میان روشهای مختلف لیزری تولید تراهرتز شامل یکسوسازی نوری در کریستال‌های غیرخطی [۱]، پدیده نوررسانش در نیمرساناها [۲] و نیز برهمکنش لیزر شدت بالا با پلاسما [۳]، می‌توان به عنوان روش‌های دارای بازده قابل قبول اشاره کرد. امروزه تلاشهای فراوانی در هر کدام در حال انجام است تا اولا بازده نهایی تولید تراهرتز را تا حد امکان به بازده کوانتومی نزدیک کند و ثانیا انرژی و توان تابش تولید شده را افزایش داده و پهنای باند منبع تراهرتز را بیشینه کنند. با به کارگیری روش یکسوسازی نوری، انرژی پالس‌های تراهرتز تولید شده به بیش از ۱۰ میکروژول در هر پالس بهبود یافته است [۱]. از طرف دیگر، پهنای باندی به بزرگی ۲۰۰ تراهرتز در روش‌های مبتنی بر پلاسما [۴] و ۷۵ تراهرتز در روش تکسوسازی نوری گزارش شده است [۱]. منابع مبتنی بر روش نوررسانش اگر چه امکان تولید پهنای باند کمتری را پوشش می‌دهند، اما با برخورداری از بازده تولید نسبی مناسب و همچنین چیدمان تجربی بدون پیچیدگی‌های تطبیق فاز و تطبیق سرعت، مورد توجه علاقه‌مندان این حوزه قرار دارند. در مقاله حاضر، با برخورداری از تجربه حاصل از روش تکسوسازی نوری در کریستال‌های غیرخطی و همچنین برهمکنش لیزر و پلاسما برای تولید تراهرتز، به تولید و آشکارسازی پالس‌های تراهرتز حاصل از به کارگیری روش نوررسانش می‌پردازیم و نتایج حاصل را ارائه و سپس مورد بحث قرار می‌دهیم.

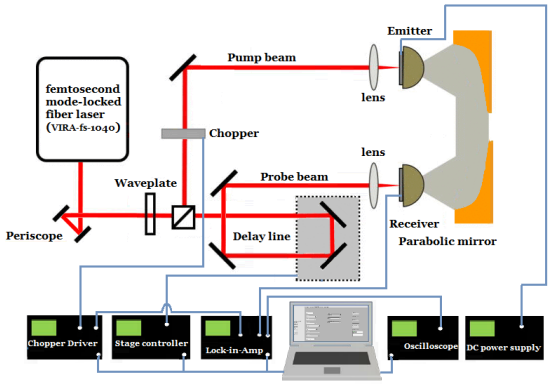
۲- چیدمان تجربی

در اثر برهمکنش پالس‌های لیزری دارای انرژی فوتونی بیشتر از انرژی گاف نیمرسانا با یک آنتن نوررسانش نیمرسانای GaAs، نور لیزری جذب شده و تولید زوج الکترون حفره می‌کند. درنتیجه یک جریان غیرخطی در مدار متصل به نیمرسانا جاری می‌شود که اندازه آن متناسب با شدت پالس لیزری است. ایجاد چنین جریان الکتریکی همچنین مستلزم اعمال یک ولتاژ مستقیم چند ده ولتی به دو سر آنتن گسیلنده است و باید به اندازه کافی قوی باشد که بتواند تمام حامل‌های بار نوررسانش را به حرکت در آورد. از سوی دیگر، جریان غیرخطی ایجاد شده آنی و متغیر با زمان است به طوریکه زمان تولید آن متناسب با طول پالس لیزری و زمان از بین رفتن آن به طول عمر حامل‌های بار بستگی دارد. در صورتی که از پالس‌های لیزری فمتوثانیه استفاده شود، این جریان می-تواند منشا تابش امواج تراهرتز باشد. در مطالعه حاضر، این جریان آنی با متمرکز کردن باریکه لیزری پالسی به قطر ۲ میلی‌متر در فاصله گاف ۳۰ میکرومتری بین الکترودهای آنتن به دست می‌آید که اندازه بزرگی آن متناسب با شدت و طول زمانی پالس لیزری می‌باشد. طول زمانی پالس لیزری برابر با ۸۰ فمتوثانیه، طول موج مرکزی آن ۱۰۴۰ نانومتر و انرژی آن برابر چند نانوژول است که توسط یک سیستم لیزری فیبری فمتوثانیه (VIRA-fs-1040 - ساخت شرکت ABLaser) تامین می‌شود. به کارگیری لیزر فیبری باعث فشرده‌تر شدن تا حد ممکن چیدمان آزمایش می‌شود که از نظر تجربی حایز اهمیت است. امواج تراهرتز تولید شده توسط یک عدسی سیلیکونی جمع‌آوری شده و به سوی آینه‌های سهموی هدایت می‌شود. نقطه‌کانونی مشترک آینه سهموی و عدسی سیلیکونی باعث می‌شود که پرتو بازتاب شده از آینه سهموی یک باریکه موازی شده باشد. این باریکه موازی توسط یک آینه سهموی دیگر کانونی شده و توسط یک عدسی سیلیکونی دیگر مجددا بر روی آنتن آشکارسازی متمرکز می‌شود. میدان الکتریکی تراهرتز بر روی آنتن آشکارسازی مانند بایاس عمل کرده و منجر به حرکت فوتوالکترون‌هایی می‌شود که حاصل برهمکنش

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

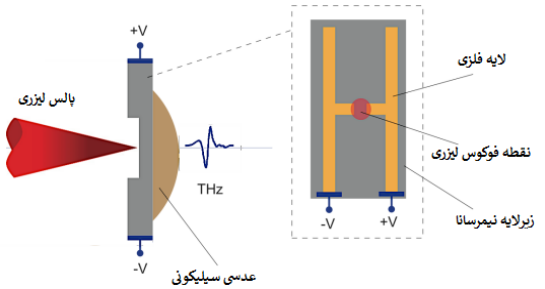
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]

باریکه پراب با آنتن هستند که به طور همزمان به آنتن برخورد می‌کند. شمایی از چیدمان تجربی مورد استفاده در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱: شماتیک چیدمان تولید و آشکارسازی امواج تراهرتز.

برای آشکارسازی پالسهای تراهرتز، از یک چیدمان پمپ-پراب استفاده می‌شود. برای این منظور، توان متوسط لیزر فمتوثانیه مورد استفاده در حدود ۱۰۰ میلی‌وات است که حدود ۸۰ میلی‌وات آن به عنوان باریکه پمپ و مابقی در مسیر باریکه پراب فرستاده می‌شود. از یک آنتن نوررسانش مشابه آنچه در بخش تولید تراهرتز اشاره شد، در قسمت آشکارسازی استفاده می‌شود. تراهرتز تولید شده توسط آنتن گسیلنده، با کمک یک عدسی سیلیکونی و یک آینه سهموی جمع‌آوری شده و به طرف آنتن گیرنده هدایت می‌شود. از سوی دیگر، باریکه پراب که بخشی از باریکه اصلی لیزر با انرژی کمتر است و توسط یک شکافنده جدا شده است، به صورت همزمان بر روی گاف ۵ میکرومتری آنتن گیرنده متمرکز می‌شود و تولید یک جریان نوررسانش می‌کند. شماتیکی از ساختار آنتن نوررسانش و هندسه برهمکنش لیزر با آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: ساختار آنتن نوررسانش و هندسه برهمکنش لیزر

با اندازه‌گیری جریان الکتریکی حاصل که متناسب با دامنه میدان تراهرتز است، میدان الکتریکی تراهرتز اندازه گیری می‌شود. به منظور کنترل همزمان بودن برخورد پالس تراهرتز و پالس لیزر با آنتن گیرنده، از یک تاخیرانداز اپتیکی استفاده می‌شود که می‌تواند با دقت چند پیکوثانیه بین دو مسیر اپتیکی تاخیر زمانی ایجاد کند. با توجه به اینکه طول زمانی پالس تراهرتز تولیدی حدود یک مرتبه بزرگتر از پالس لیزری مورد استفاده است، با تغییر میزان تاخیر زمانی در یک بازه معین می‌توان تغییرات زمانی میدان الکتریکی تراهرتز را استخراج کرد.

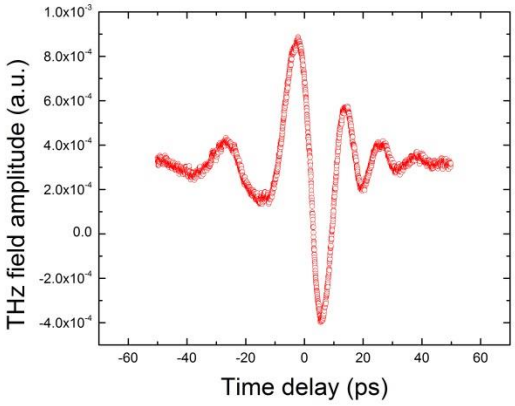
۳- نتایج تجربی و تحلیل

توزیع زمانی میدان الکتریکی تراهرتز تولید شده در هوای آزاد در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل از برهمکنش پالس لیزری پراب با قسمت‌های مختلف زمانی میدان الکتریکی پالس تراهرتز و ثبت دامنه و فاز میدان آن به دست آمده است. همچنین به منظور کاهش نویز، از یک تقویت کننده قفل‌شونده استفاده شده است. لذا از یک چاپر با فرکانس دلخواه برای مدولاسیون باریکه لیزری پمپ استفاده می‌شود و همین سیگنال الکترونیکی به عنوان سیگنال مرجع در تقویت کننده قفل‌شونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، فرایند حرکت تاخیرانداز، میان‌گیری اطلاعات مربوط به هر نقطه و در نهایت ثبت آن توسط یک برنامه متمرکز رایانه‌ای کنترل و اجرا می‌شود.

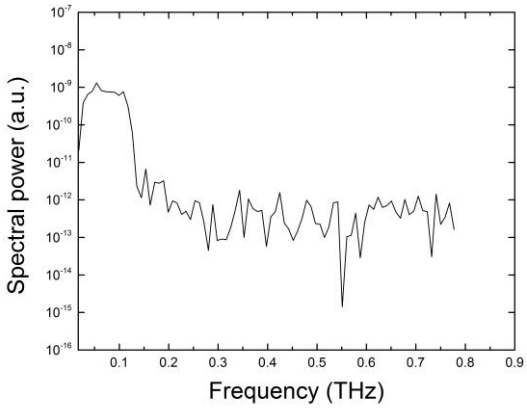
مشاهده می‌شود که پهنای زمانی پروفایل میدان تراهرتز تولید شده از مرتبه پیکوثانیه است و از نسبت سیگنال به نویز بسیار بالایی در فرکانسهای پایینتر برخوردار است. با استفاده از توزیع زمانی به دست آمده برای میدان، طیف تراهرتز تولید شده را می‌توان مطابق شکل (۳) به دست آورد. مشاهده می‌شود که طیف تراهرتز حاصل محدود به کمتر از ۱ تراهرتز و قله آن متمایل به فرکانس‌های پایین-تر است. علاوه بر این، در این شکل مشاهده می‌شود که دو قله جذبی در فرکانس‌های ۰,۵۵ و ۰,۷۵ تراهرتز روی داده است. از مقایسه طیف حاصل در هوای آزاد با طیف خطوط جذبی بخار آب [۵] می‌توان نتیجه گرفت که خطوط جذبی مشاهده شده متعلق به جذب مولکول‌های بخار آب موجود در هوا می‌باشد.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]



شکل ۲: توزیع زمانی میدان الکتریکی پالس تراهرتز تولید شده در هوای آزاد.



شکل ۳: توزیع طیفی میدان الکتریکی پالس تراهرتز تولید شده در هوای آزاد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج تجربی تولید و آشکارسازی پالس‌های تراهرتز با به کارگیری آنتن نوررسانش نیمرسانای GaAs تحت تابش پالسهای لیزری فمتوثانیه ارائه و مورد بررسی قرار گرفت. میدان زمانی تراهرتز تابش شده دارای پهنایی از مرتبه پیکوثانیه است که تبدیل فوریه آن طیف تابشی را در بازه فرکانسی ۰,۰۱ تا ۰,۹ تراهرتز نشان می‌دهد. خطوط جذبی ظاهر شده در طیف فرکانسی حاصل از اندازه‌گیری میدان تراهرتز در هوای آزاد با طیف جذبی بخار آب منطبق است. همچنین نسبت سیگنال به نویز نسبتا بالایی مربوط به فرکانسهای پایینتر در شکل طیفی میدان تراهرتز اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود.

۵- سپاسگزاری

از همکاران محترمی که در انجام این پژوهش ما را حمایت کرده‌اند، بویژه جناب مهندس هاشمی‌نژاد و مهندس بابانژاد تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

[1] K. L. Yeha, M. C. Hoffmann, J. Heblingb, and K. A. Nelson, Appl. Phys. Letters Vol. 90, Issue 17, pp. 171121 (2007).
[2] C. M. Collier, T. J. Stirling, I. R. Hristovski, J. D. A. Krupa, and J. F. Holzman, Sci Rep Vol. 6, pp. 23185. . (2016).
[3] F. Jahangiri, M. Hashida, S. Tokita, T. Nagashima, M. Hangyo, and S. Sakabe, Appl. Phys. Lett. 102, 191106 (2013).
[4] V Blank, M D Thomson, and H G Roskos, New Journal of Physics 15, pp. 075023 (2013).
[5] Martin van Exter, Ch. Fattinger, and D. Grischkowsky, Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor, Optics Letters Vol. 14, Issue 20, pp. 1128-1130 (1989).

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-20]