



عنوان طراحی مولد پر قدرت امواج تراهرتز جهت بکارگیری در آزمون غیر مخرب قرص سوخت هسته‌ای

مرادیان نژاد، فرزاد* (۱)

سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت سوخت راکتورهای هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۹۵۷-۸۱۴۶۵

چکیده:

در این پژوهش، یک مولد پر قدرت به عنوان منبع تولید پرتو تی به منظور استفاده در ارزیابی قرص سوخت هسته‌ای به صورت غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز طراحی شده است. از مزایای بالقوه مولد طراحی شده می‌توان به افزایش بهره‌وری و ایجاد عمق نفوذ بالا در بافت نمونه اشاره کرد. توان و پهنای باند خروجی از این مولد برای تصویربرداری از بافت‌های سرامیکی سخت از جمله قرص سوخت هسته‌ای جهت رؤیت ساختار داخلی آن و تشخیص عیوب احتمالی درونی بدون نیاز به تخریب نمونه کاملاً مناسب است. از این طراحی در ساخت دستگاه آزمون غیرمخرب قرص سوخت هسته‌ای استفاده شده است.

کلمات کلیدی: مولد پر قدرت، امواج تراهرتز (THz Waves)، پرتو تی (T-ray)، آزمون غیرمخرب (NDT)، قرص سوخت هسته‌ای

مقدمه:

ارزیابی محصولات تولیدی به صورت غیرمخرب در صنایعی که هزینه‌ی زیادی صرف تولید آن محصول می‌گردد از اهمیت بالایی برخوردار است. صنایع تولید سوخت هسته‌ای از این جمله صنایع هستند که تولید هر عدد قرص سوخت هسته‌ای برای آن صنایع هزینه‌ی زیادی در پی خواهد داشت. از این رو بکارگیری آزمون‌های غیرمخرب در بررسی و ارزیابی قرص سوخت تولید شده بدون آسیب رسیدن به آن کمک شایانی به پیشبرد اهداف در تولید سوخت هسته‌ای می‌نماید. با پیشرفت علم و دستیابی به فناوری‌های جدید، آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز (THz Waves) معروف به "پرتو تی" (T-ray)^۲ برای بررسی بافت‌های سرامیکی که قرص سوخت هسته‌ای را نیز شامل می‌شود معرفی گردید [۱].

پرتو تی جزو تابش‌های الکترومغناطیسی است که در بازه فرکانسی 10^{11} - 10^{13} Hz بین ناحیه طیفی فروسرخ و ماکروویو قرار دارد. این پرتو خواصی از قبیل غیریونسازی، قابلیت نفوذ در مواد غیرقطبی و خشک و امکان دریافت اطلاعات طیف سنجی را داراست که قابلیت‌های آن در زمینه‌های گوناگون نظیر کاربردهای صنعتی، پزشکی، انتقال اطلاعات،

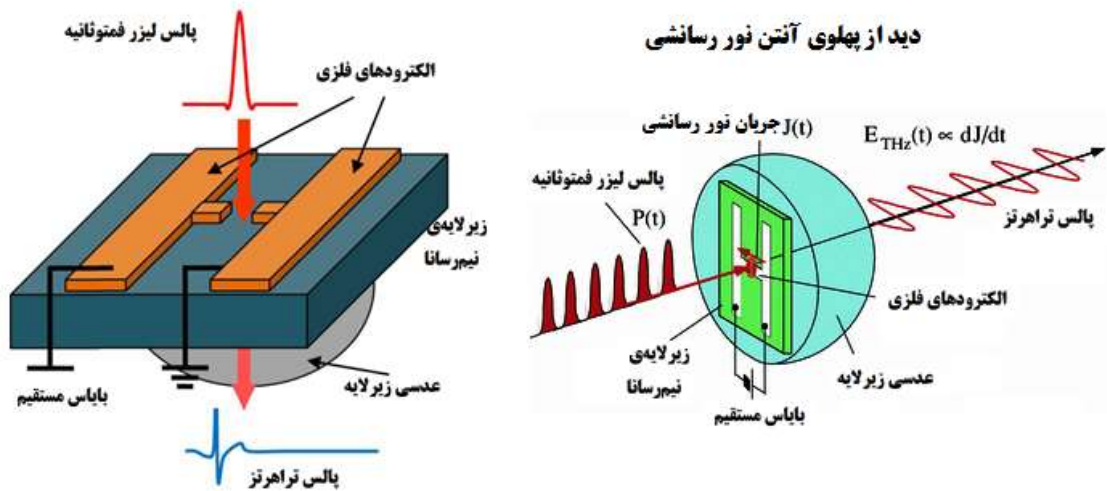
^۱Terahertz waves

^۲T-ray



حوزه نانوتکنولوژی به اثبات رسیده است [۲ تا ۴]. خاصیت نفوذکنندگی پرتو تی در قرص سرامیکی سوخت هسته‌ای، امکان بررسی عیوب ظاهری و مخفی درون این قرص را برای کارشناسان این صنعت فراهم می‌آورد که بدون تخریب قرص سوخت می‌توانند از ماهیت درونی آن آگاهی پیدا کنند. اما استفاده از این پرتو به منظور انجام آزمون غیرمخرب قرص سوخت هسته‌ای مستلزم ارتقای توان مولد آن است که ارتقای توان تابش امواج تراهرتز به موضوع روز بین متخصصین این حوزه مبدل شده و تا کنون روش‌های گوناگون و پیچیده‌ای برای این هدف بکار برده شده که منجر به افزایش قدرت مولد این امواج گردیده است.

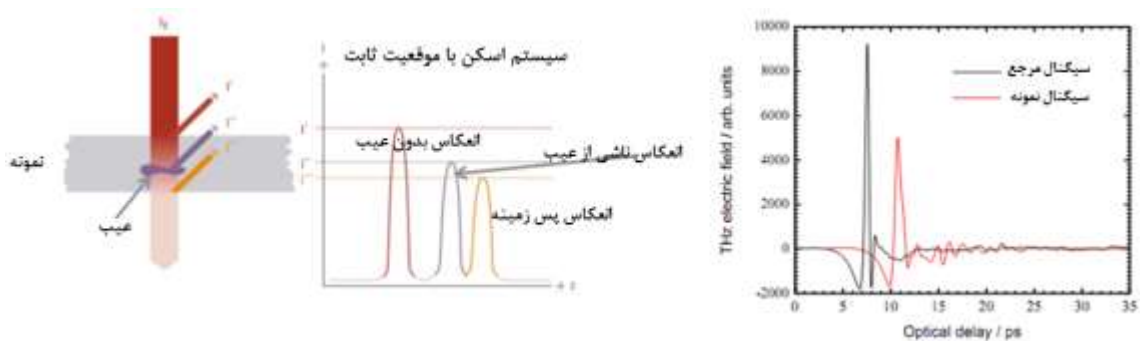
رایج‌ترین روش تولید امواج الکترومغناطیسی استفاده از مولدهای الکتریکی در قالب آنتن‌های تابشی برای طیف مورد نظر است که تولید امواج تراهرتز نیز از این رویه مستثنی نیست. یکی از روشهای تولید امواج تراهرتز پالسی، استفاده از آنتن نوررسانشی است. این آنتن یک سوییج الکتریکی است که از خاصیت افزایش رسانایی الکتریکی نیمرساناها و نارساناها هنگامیکه تحت نور قرار می‌گیرند، استفاده می‌کند. شرط تابش امواج تراهرتز از آنتن نوررسانشی، عملکرد زیر پیکو ثانیه این سوییج است که تابعی از طول پالس لیزر تحریک کننده آنتن و جنس زیر لایه‌ی نیمرسانای بکار رفته در ساخت آنتن است. از این رو با تغییر در اینگونه پارامترها و هندسه‌ی کنار یکدیگر قرار دادن اجزای تشکیل دهنده آنتن و با بررسی جزئیات طراحی می‌توان آنتن تابش تراهرتز پالسی با اهداف متفاوت طراحی نمود. تولید امواج تراهرتز پالسی با توان بالا (پر قدرت)، بسیار باریک، پهن باند، تنظیم پذیر از اهدافی است که در طراحی آنتن‌های نوررسانشی دنبال می‌شود و در طراحی یک آنتن می‌توان یک و یا چند هدف هم‌راستا از این اهداف را طرح‌ریزی نمود. مولد امواج تراهرتز شامل دو الکتروود فلزی پوشش شده روی بلور نیمرسانای گالیوم آرسناید است که همواره یک بایاس مستقیم بین الکتروودهای آن اعمال می‌شود. شکل (۱) شمایی ساده از یک مولد امواج تراهرتز پالسی را نشان می‌دهد [۵].



شکل (۱) شمایی ساده از یک مولد امواج تراهرتز پالسی [۵]

روش کار :

انجام آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز با برسی تغییر شکل، تغییر محل و یا قطع کامل سیگنال نمونه^۲ در مقایسه با سیگنال مرجع^۱ قابل انجام است [۶]. در شکل (۲) شماتیکی از نحوه تشخیص نقص در یک نمونه به همراه یک شکل از مقایسه سیگنال مرجع (مربوط به قسمتی از بافت که فاقد عیب است) با سیگنال نمونه (مربوط به قسمتی از بافت که حاوی عیب است) برای یک بافت خاص قابل مشاهده است [۷].



شکل (۲) نحوه تشخیص عیب در یک نمونه از مقایسه سیگنالهای مرجع و نمونه برای یک بافت خاص [۷]

^۲Sample Signal

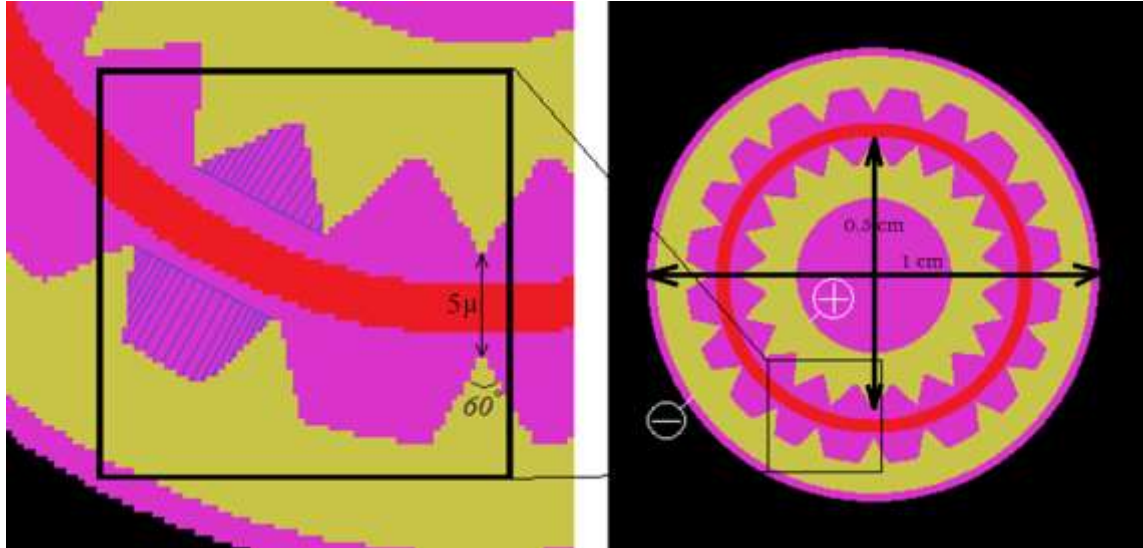
^۱Reference Signal



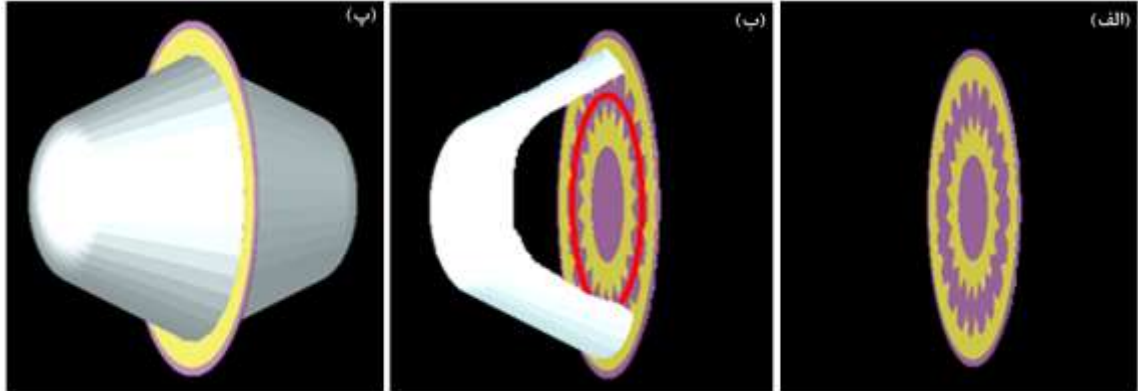
همانگونه که در شکل (۲) قابل رویت است، شدت سیگنال‌های مرجع و نمونه هنگام عبور و بازتاب از بافت نمونه که قرص سوخت هسته‌ای می‌تواند باشد اهمیت کلیدی دارد و اگر این شدت که از قدرت مولد تابش ترانز نشأت می‌گیرد به قدر کافی نباشد، انجام این آزمون مقدور نخواهد بود. پس میزان قدرت تابش مولد امواج ترانز باید تا حد امکان با بهره‌گیری از فناوریهای نوین ارتقا یابد.

با وجود تمامی مزایای مولد امواج ترانز در قالب آنتن، باید به این نکته اشاره شود که تحریک این نوع آنتن با شدت بالای امواج نوری موجب اشباع نوری آنتن می‌شود که این امر به رابطه‌ی غیرخطی بین توان نوری ورودی به آنتن و توان ترانز تابشی از آن منجر شده که در اثر آن قدرت خروجی از آنتن به شدت پایین می‌آید [۸]. این مورد یکی از مهمترین محدودیت‌های این نوع آنتن‌ها در کاربردهای تصویربرداری با استفاده از امواج ترانز است که امروزه تقویت توان خروجی مولدهای ترانز در تمامی مقیاس‌ها بسیار مهم شده است [۹ و ۱۰]. استفاده از یک آرایه از آنتن‌های نور رسانشی یک راه متداول برای غلبه بر این محدودیت است [۱۱]. با پیروی از این مسیر رایج، مولدی مشتمل بر ۲۰ عدد آنتن در چیدمان آرایه‌ای دایره‌ای شکل طراحی شد. این آرایه از دو رینگ به قطرهای ۰/۵ و ۱ سانتیمتر و ضخامت ۱ میکرومتر از جنس طلا که ۲۰ عدد آنتن دوقطبی را شامل می‌شود که بر روی یک لایه‌ی نازک گالیوم آرسناید رشد یافته در دمای پایین به ضخامت ۰/۳ میکرومتر لایه نشانی شده‌اند تشکیل شده است. در فرایند ساخت آنتن نور رسانشی، نمونه‌ی گالیوم آرسناید رشد یافته در دمای پایین بر روی یک نیم‌عایق گالیوم آرسناید^۴ به عنوان زیرساخت رشد داده می‌شود. قطر بلور آنتن و زیرلایه‌ی آن ۱ سانتیمتر و جنس زیرلایه گالیوم آرسناید به ضخامت ۲ میکرومتر انتخاب شده است. ساختار آرایه، جزئیات ابعادی، ناحیه‌ی تحریک آنتن (نوار قرمز رنگ) در شکل (۳) نشان داده شده است.

^۴Semi Insulator GaAs (SI-GaAs)



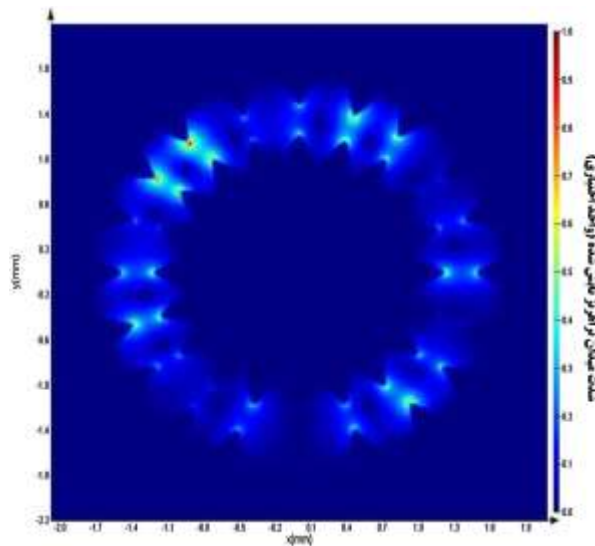
شکل (۳) ساختار کلی آرایه (سمت راست)، جزئیات ابعادی ناحیه‌ی تحریک آنتن (نوار قرمز رنگ) (سمت چپ) زاویه‌ی نوک تیز الکترودهای دوقطبی ۶۰ درجه و فاصله‌ی بین دو نوک تیز آن‌ها ۵ میکرومتر است. در آنتن‌های دوقطبی فاصله‌ی بین نوک‌های تیز دو الکتروود بایستی توسط لیزر فمتوثانیه تحریک گردد. از این رو برای تحریک این آرایه به باریکه لیزر فمتوثانیه به شکل رینگ (نوار قرمز رنگ نشان داده شده در شکل (۳)) که در یک لحظه تمامی فاصله‌ی بین ۲۰ جفت الکتروود را تحریک کند نیاز است. برای ایجاد لکه‌ی رینگی شکل لازم است لکه‌ی گاوسی از یک هدایت کننده‌ی دوکی شکل توخالی عبور کند. جنس این هدایتگر توخالی بایستی بگونه‌ای انتخاب شود که هنگام هدایت باریکه لیزر کمترین اتلاف و پاشندگی را ایجاد نماید که مناسبترین وسیله برای این کار مخروط سیلیکاتی است که هم از نظر جنس مناسب است و هم از لحاظ ساخت راحت و مقرون به صرفه می‌باشد. از طرفی هنگامی که ناحیه‌ی فعال بین هر زوج الکتروودها تحریک گردید امواج تراهرتز تولید شده از هر یک از جفت الکتروودها متصاعد می‌شود که لازم است این امواج تجمیع و تحت یک گسیلنده تابش شوند. به منظور تجمیع این امواج تراهرتز تولیدی از یک مخروط سیلیکاتی توخالی معکوس مخروط اولی کمک گرفته می‌شود. زیرا سیلیکون در محدوده بسامدی تراهرتز نیز دارای حداقل میزان اتلاف و پاشندگی می‌باشد. نمایی از آرایه الکترودهای دوقطبی بر روی زیرلایه، مخروط سیلیکاتی ورودی باریکه لیزر نصب شده روی آرایه‌ی آنتن و مخروط سیلیکاتی خروجی تابش تراهرتز نصب شده پشت آرایه‌ی آنتن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴) نمایی از الف) آرایه الکترودهای دوقطبی بر روی زیرلایه، ب) برشی از مخروط سیلیکاتی ورودی باریکه لیزر نصب شده روی آرایه‌ی آنتن و پ) مخروط سیلیکاتی و سیلیکونی نصب شده رو و پشت آرایه‌ی آنتن

نتایج :

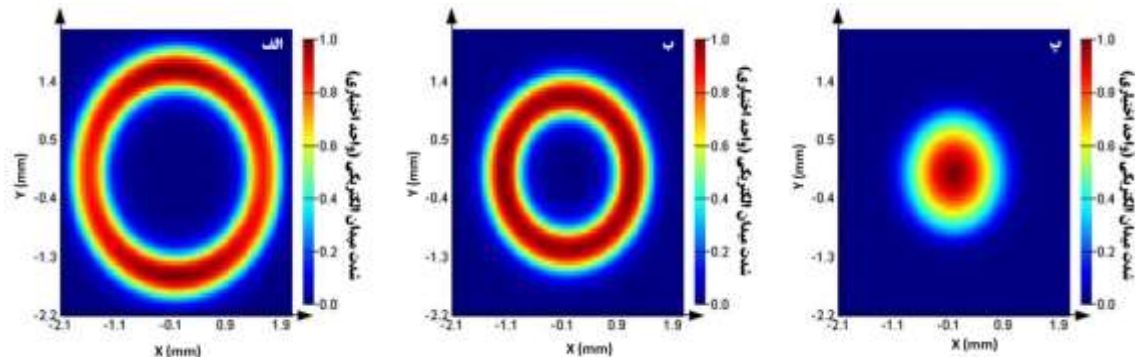
آرایه‌ی مدل شده بوسیله‌ی باریکه لیزر که از یک مخروط توخالی عبور داده شده تحریک می‌شود. در این شرایط ۲۰ عدد زوج الکترون بایاس شده که هرکدام نقش یک آنتن را دارند بصورت همزمان شروع به تابش پالس تراهرتز می‌کنند. نمایی از تابش تراهرتز آرایه در زمان تحریک در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵) نمایی از تابش تراهرتز آرایه‌ی تحریک شده

همانگونه که در شکل (۵) قابل مشاهده است، میزان شدت تابش در ناحیه‌ی فعال تمامی زوج الکترودها یکسان نیست. این امر ناشی از عدم تحریک یکنواخت زوج الکترودها توسط باریکه‌ی لیزر در رینگ تحریک کننده است. منشاء این عدم یکنواختی، تفاوت در جفت شدگی قطبش باریکه‌ی لیزر رینگی شکل با راستای هر یک از زوج الکترودها است. این عدم یکنواختی در تحریک زوج الکترودها طی تحریک‌های متوالی پالسی شکل نسبت به مکان زوج الکترودها تغییر کرده و در هر پالس تحریک تعدادی از زوج الکترودها بصورت تصادفی در شرایط بیشینه تابش قرار می‌گیرند. پس از تابش تراهرتز توسط زوج الکترودها، امواج تابش شده توسط مخروط توخالی پشت آرایه هدایت شده تا بصورت تجمعی از آرایه تابش شود. مراحل هدایت تابش امواج تراهرتز تولیدی از آرایه در سه مقطع عرضی لبه‌ی ورودی، وسط ارتفاع و نوک مخروط پستی در شکل (۶) آورده شده است.

توزیع شدت میدان نامتقارن نشان داده شده در شکل (۶-الف) با توزیع شدت در شکل (۵) کاملاً همخوانی دارد که این توزیع شدت پس از طی نیمی از مسیر داخل مخروط مطابق شکل (۶-ب) تقریباً یکنواخت شده و در هنگام خروج از نوک مخروط مطابق شکل (۶-پ) بصورت توزیع لکه‌ی گوسی خارج می‌شود. بنابر این عدم یکنواختی توزیع شدت تابش در زیرلایه آرایه پس از عبور از مخروط پستی از بین رفته و توزیع شدت کاملاً گوسی شکل از آنتن خارج می‌شود.



شکل (۶) مراحل هدایت تابش در سه مقطع عرضی الف) لبه‌ی ورودی، ب) وسط ارتفاع و پ) نوک مخروط



بحث و نتیجه گیری :

بیشینه توان قابل تولید از آرایه به ولتاژ شکست^۱ محدود می شود که این مقدار برای زیرلایه از جنس گالیوم آرسناید رشد یافته در دمای پایین در محدوده ولتاژ بایاس ۱۱۰ تا ۲۲۰ ولت بین فاصله الکترودی میکرومتری در بازه ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوولت بر سانتیمتر است [۱۲]. بنابر این شدت لیزر تحریک کننده بایستی بگونه ای انتخاب شود که به زیرلایه ی آرایه آسیب نرسد. در نتیجه برای تحریک این آرایه بایستی از لیزر پالسی با توانی در بازه ۷۰۰ تا ۹۰۰ میلی وات با میدان الکتریکی بایاس در محل فاصله الکترودها بین ۳۰ تا ۴۰ کیلوولت بر سانتیمتر با نرخ ۸۰ تا ۱۰۰ مگاهرتز و پهنای پیک در نصف بیشینه ارتفاع ۱۵۰ تا ۲۰۰ فمتوثانیه استفاده شود. در این شرایط توان خروجی آرایه در بازه ۲۰ تا ۳۰ میکرووات در قله بسامدی ۰/۵ تا ۱ تراهرتز برای کل پهنای باند تراهرتزی محاسبه گردید. توان خروجی از این آرایه برای تصویربرداری از بافت های سرامیکی سخت از جمله قرص سوخت هسته ای جهت رؤیت ساختار داخلی آن و تشخیص عیوب احتمالی درونی بدون نیاز به تخریب نمونه کاملاً مناسب است که از این طراحی در ساخت دستگاه آزمون غیرمخرب قرص سوخت استفاده شده است.

مراجع :

1. Moradiannejad, F., Zangeneh H., Panahi, O., Golzar Shahri M., Mortazavi S.M., Soori, A., "Modern Technology of Nondestructive Test Using Terahertz Waves". JNDT_Volume 2_Issue 3_Pages 42-49 (2019).
2. Siegel, P.H., "Terahertz technology". IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 50, pp. 910-928 (2002).
3. Zimdars, D., White, J.S., Stuk, G., "Large area terahertz imaging and non-destructive evaluation applications". Insight, 48, pp. 537-539 (2006).
4. Karpowicz, N., Zhong, H., Xu, J., Lin, K.I., Hwang, J.S., Zhang, X.C., "Non-destructive Sub-THz CW Imaging". Proc. SPIE, 2005, 5727, pp. 132-142 (2005).
5. Y. S. Lee, "Principles of Terahertz Science and Technology". Springer, ISBN 978-0-387-09539-4 (2008).
6. Terahertz ray data in space shuttle inspection". Quant. Nondestruct. Eval., 894, pp.425-431 (2017).

^۱Breakdown voltage



7. Wietzke, S., Jordens, C., Krumbholz, N., “Terahertz imaging: A new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints”. J. Eur. Op. Soc. Rapid Publ., 2, pp. 212-216 (2007).
8. Huang Y., Khiabani N., Shen Y., Li D., “Terahertz photoconductive antenna efficiency”, in Antenna Technology (iWAT), 2011 International Workshop on, pp. 152-156 (2011).
9. Lepeshov S., Gorodetsky A., Krasnok A., Rafailov E., Belov P. “Enhancement of terahertz photoconductive antenna operation by optical nanoantennas”, Laser Photonics Rev., Vol. 11 (2017).
10. Bahk Y. M., Han S., Rhie J., Park J., Jeon H., Park N., Kim D. S., “Ultimate terahertz field enhancement of single nanoslits”, Phys. Rev. B, Vol.95, 075424 (2017).
11. Graber B., Wu D.H., Kim C., “High power terahertz fields generated by an arrayed photoconductive antenna structure”, ASP march meeting (2015).
12. Tani M., Matsuura S., Sakai K., and Nakashima S., "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs," Appl. Opt., vol. 36, pp. 7853-7859 (1997).