بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق-الکترونیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق-الکترونیک

عنوان پایان نامه

تولید امواج تراهرتز بر اساس ساختار های کامپوزیت فوتونیکی

استاد راهنما

دکتر علی رستمی

دکتر سامیه مطلوب

استاد مشاور

دکتر محبوبه دولتیاری

پژوهشگر

محمد رانین خردمند

بهمن ۱۳۹۳

تقدیم به:

پدر و مادر مهربانم

سپاس گذاری...

از استاد بزرگوارم جناب آقای پروفسور علی رستمی که در تمام مراحل انجام این پایان نامه، همواره از راهنمایی های ارزنده ایشان بهره برده ام سپاسگذارم.

از سرکار خانم دکتر مطلوب که کمک های ایشان همواره شامل حال اینجانب بوده است.

هم چنین از سرکار خانم دکتر دولتیاری که زحمت مشاوره پایان نامه بنده را برعهده گرفته اند.

نام خانوادگی: رانین خردمند **نام:** محمد

عنوان پایان نامه: تولید امواج تراهرتز بر اساس ساختار های کامپوزیت فوتونیکی

استاد راهنما: دکتر علی رستمی و دکتر سامیه مطلوب

استاد مشاور: دکتر محبوبه دولتیاری

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق-الکترونیک

گرایش: طراحی مدارات مجتمع نوری

دانشگاه: دانشگاه تبریز **دانشکده:مهندسی** برق و کامپیوتر

تاریخ فارغ‌التحصیلی: بهمن ۹۳ **تعداد صفحات:** ۱۱۴

کلیدواژه‌ها: کریستال فوتونیک یک بعدی – تولید تراهرتز – تولید تفاضل فرکانسی

چکیده: فناوری تراهرتز کاربرد های بسیار زیادی در حوزه های مختلف مانند طیف بینی، عکس برداری زیرمیلیمتری ، مسائل امنیتی،پزشکی ،مخابرات نوری و ده ها کاربرد دیگر دارند.

در این پایان نامه هدف تولید طراحی منبع تراهرتز بر مبنای کریستال فوتونیک یک بعدی می‌باشد. برای این کار ساختاری شامل کاواک چند لایه براگ و آینه های براگ توزیع شده یک بعدی شامل موادی با غیرخطی بالا و آستانه تحمل میدان الکتریکی بالا به کار گرفته می شود.موادی که در این پایان نامه مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل GaAsو AlAs می باشد. دو ساختار کلی در این پایان نامه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ساختار اول از دو لایه با ضخامت نیم طول موجی به همراه یک ساختار براگ توزیع شده(DBR) که از اطراف توسط دو آینه ی براگ توزیع شده (DBR)احاطه شده است. و ساختار دیگر شامل دو ساختار پریودیک می‌باشد، یک ساختار پریودیک که میان دو ساختار آینه های براگ (DBR) قرار گرفته است و سپس با استفاده از انتشار نور و تولید فرکانس و فرکانس پمپ و با توجه به خاصیت غیر خطی نور با استفاده از تولید تفاضل فرکانسی امواج تراهرتز را تولید می‌کند. در انتها هم از ساختار های شبه پریودیک استفاده می شود.

فهرست مطالب

فصل اول:بررسی منابع..... ۱

۱-۱: امواج تراهرتز..... ۲

۱-۲: کاربرد های امواج تراهرتز..... ۴

۱-۳: منابع تولید تراهرتز..... ۱۱

۱-۳-۱: لیزر کوانتوم آبشاری..... ۱۱

۱-۳-۲: لیزر های مادون قرمز دور..... ۱۳

۱-۳-۳: تولید تراهرتز بر اساس ترکیب نوری..... ۱۳

۱-۳-۴: منابع الکترون آزاد..... ۱۴

۱-۳-۵: تولید امواج تراهرتز با استفاده از خاصیت غیر خطی نور..... ۱۴

۱-۴: بلورهای فوتونیکی..... ۱۶

۱-۴-۱: تاریخچه..... ۱۶

۱-۴-۲: معرفی بلورهای فوتونی..... ۱۷

۱-۴-۳: شکاف باند فوتونیکی کامل..... ۱۸

۱-۴-۴: پارامترها و ویژگی‌های مهم بلورهای فوتونیکی..... ۱۹

۱-۴-۵: فوتونیک کریستال یک بعدی..... ۲۰

۱-۴-۶: فوتونیک کریستال دو بعدی..... ۲۱

۱-۴-۷: فوتونیک کریستال سه بعدی..... ۲۳

۱-۵: بلورهای فوتونیکی شبه پریودیک..... ۲۴

۱-۵-۱: ساختارهای فیبوناچی..... ۲۵

۱-۵-۲: ساختارهای تو-مورس..... ۲۸

۱-۵-۳: ساختارهای دو برابر پریود ۲۹

فصل دوم: مواد و روش ها ۳۱

۲-۱: اپتیک غیرخطی ۳۲

۲-۲: برهمکنش‌های نوری غیرخطی ۳۴

۲-۲-۱: تولید هماهنگ دوم ۳۴

۲-۲-۲: تولید بسامد مجموع وبسامد تفاضل ۳۶

۲-۳: تعریف پذیرفتاری غیرخطی ۳۹

۲-۴: ویژگی‌های پذیرفتاری غیرخطی ۴۲

۲-۴-۱: حقیقی بودن میدان ۴۲

۲-۴-۲: تقارن جایگشت ذاتی ۴۳

۲-۴-۳: تقارن‌های محیط بدون اتلاف ۴۴

۲-۴-۴: تقارن کلاینمن ۴۵

۲-۵: نمادنگاری قراردادی ۴۶

۲-۶: مقدار موثر D ۴۸

۲-۷: معادله موج در محیط‌های نوری غیرخطی ۴۹

۲-۸: معادلات همبسته موج برای تولید بسامد تفاضل ۵۲

۲-۹: تطبیق فاز ۵۶

۲-۱۰: قضیه بلاخ و ساختار جامد نواری متناوب ۵۹

۲-۱۱: روش‌های عددی در تحلیل بلورهای فوتونی ۶۰

۲-۱۱-۱: روش‌های عددی در حوزه زمان ۶۱

۲-۱۱-۲: روش‌های عددی در حوزه بسامد ۶۲

۲-۱۲: روش تفاضل‌های محدود در حوزه زمان (FDTD) ۶۳

۲-۱۲-۱: ویژگی‌های FDTD ۶۳
۲-۱۲-۲: اصول FDTD ۶۴
۲-۱۳: الگوریتم YEE ۶۹
۲-۱۳-۱: حل معادله موج یک بعدی با الگوریتم Yee ۷۱
۲-۱۴: حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم YEE ۷۴
۲-۱۴-۱: حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم Yee در حالت یک بعدی ۷۴
۲-۱۴-۲: حل معادلات کرل ماکسول با الگوریتم Yee در حالت دو بعدی ۷۶
۲-۱۵: بررسی شرایط مرزی ۷۸
۲-۱۵-۱: شرط مرزی PML ۷۹
۲-۱۶: شرط پایداری در الگوریتم YEE ۸۵

فصل سوم: نتایج و بحث ۸۶

۳-۱: مقدمه ۸۷
۳-۲: شبیه سازی ساختار فوتونیک کامپوزیت ۸۹
۳-۳ شبیه سازی ساختار کامپوزیت فوتونیک با دو منبع ۹۸
۳-۴: استفاده از ساختار های شبه پریودیک به عنوان کاواک ۱۰۳
۳-۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۷

منابع و مراجع ۱۰۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: نمایش طیف الکترومغناطیسی. محدوده امواج تراهرتز با دایره نشان داده شده است.....۳

شکل ۱-۲: طیف جذب بخارآب در ناحیه تراهرتز.....۶

شکل ۱-۳: استفاده از امواج تراهرتز در برنامه های امنیتی: متن نوشته شده در نامه‌ی درون پاکت، توسط امواج تراهرتز خوانده شده است. شکل سمت چپ متن نوشته شده با چاپگر لیزری، شکل سمت راست متن نوشته شده باخودکار و مداد. ۶

شکل ۱-۴: استفاده از امواج تراهرتز در برنامه های امنیتی و تشخیص مواد مخدر.تصویربرداری به وضوح سه نوع پودر کدئین، کوکائین و ساکارز که در پاکت پنهان شده را از هم تشخیص می‌دهد.....۷

شکل ۱-۵: استفاده از امواج تراهرتز در برنامه های امنیتی و تشخیص سلاح.تصویربرداری تراهرتز، شکل سمت راست اسلحه و شکل سمت چپ کارد پنهان شده توسط فرد را تشخیص داده است.....۸

شکل ۱-۶: استفاده از امواج تراهرتز در برنامه های امنیتی، شکل سمت چپ تصویر گرفته شده اثر انگشت شست با استفاده از نور مرئی و شکل سمت راست با استفاده از امواج تراهرتز است که دارای سرعت و دقت بیشتری در تصویربرداری می باشد[۶].....۹

شکل ۱-۷: استفاده از امواج تراهرتز در پزشکی: تشخیص بافت‌های سرطانی و توده‌های تخریب شده سلولی با استفاده از تصویربرداری تراهرتز.....۱۰

شکل ۱-۸: استفاده از امواج تراهرتز در کشاورزی: تصویر گرفته شده از بذر ذرت، شکل سمت چپ تصویر با نور مرئی و شکل سمت راست تصویر گرفته شده با امواج تراهرتز.....۱۱

شکل ۱-۹: a) هندسه تولید بسامد تفاضل b) توصیف تراز-انرژی.....۱۵

شکل ۱-۱۰: مثال ساده ای از بلورهای فوتونیکی یک،دو و سه بعدی.رنگ‌های مختلف نشان‌دهنده مواد با ثابت دی الکتریک مختلف هستند. تعریف مشخصه‌ی بلور فوتونیک متناوب بودن ماده دیالکتریک در امتداد یک یا چند محور است..... ۱۹

شکل ۱-۱۱: ساختار فوتونیک کریستال چند لایه نامحدود که تابع دی الکتریک $\varepsilon(z)$ آن تنها در راستای z می باشد..... ۲۰

شکل ۱-۱۲: چپ: میله های دی الکتریک در هوا. راست: حفرههای هوایی در دی الکتریک..... ۲۲

شکل ۱-۱۳: ساختار هایی از فوتونیک کریستال دو بعدی. چپ: ساختار چهار ضلعی که فقط شامل شکاف باند فرکانسی برای قطبش TE است. راست: ساختار شش ضلعی دارای شکاف باند برای هر دو قطبش TE و TM، در این حالت ساختار دارای شکاف باند کامل است..... ۲۲

شکل ۱-۱۴: سه نوع آرایش مختلف فوتونیک کریستال سه بعدی. (۱) شبکههای چوب بست مربعی، (۲) ساختار اپال معکوس FCC، (۳) ساختار ترکیبی GLAD..... ۲۴

شکل ۲-۱: ۱:الف)هندسه تولید هماهنگ دوم ب) نمودار تراز-انرژی که تولید هماهنگ دوم را توصیف می‌کند..... ۳۵

شکل ۲-۲ الف)هندسه تولید بسامد مجموع ب)توصیف تراز-انرژی..... ۳۸

شکل ۲-۳: الف)هندسه تولید بسامد تفاضل ب)توصیف تراز-انرژی..... ۳۹

شکل ۲-۴:شماتیک تولید بسامد تفاضل..... ۵۲

شکل ۲-۵: دو دسته کلی در روش‌های عددی..... ۶۱

شکل ۲-۶: روش‌های عددی در حوزه زمان..... ۶۱

شکل ۲-۷: روش‌های عددی در حوزه بسامد..... ۶۲

شکل ۲-۸: سلول واحد Yee به همراه موقعیت بردارهای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی..... ۷۰

شکل ۲-۹: نمودار فضا-زمان الگوریتم Yee برای انتشار موج یک بعدی..... ۷۱

شکل ۲-۱۰: نحوه محاسبه میدان‌ها در فرمول بندی FDTD یک بعدی..... ۷۶

شکل ۲-۱۱: نحوه اعمال شرط مرزیPML..... ۸۴

شکل ۳-۱: شماتیک ساختار کامپوزیت فوتونیک..... ۹۰

شکل ۳-۲: چگونگی ساختار باند عبور در ساختار کامپوزیت فوتونیک در حضور و عدم حضور لایه۲/ λ..... ۹۱

شکل ۳-۳:تاثیر افزایش لایه های اینه های مرکزی DBR..... ۹۲

شکل ۳-۴: تاثیر افزایش لایه های اینه های DBR کناری..... ۹۲

شکل ۳-۵: تغییرات اختلاف فرکانسی ناشی از تغییر تعداد لایه های DBR مرکزی..... ۹۳

شکل ۳-۶: توزیع میدان الکتریکی مماسی در لایه های مختلف..... ۹۴

شکل ۳-۷: توزیع یک بعدی دامنه میدان را برای مد کاواک در طول موجهای مد کاواک برابر ۱۴۸۷ نـانومتر (سمت چپ) و ۱۵۲۰ نانومتر (سمت راست)..... ۹۴

شکل ۳-۸: پروفایل توزیع بزرگی میدان در داخل ساختار به ازای تحریک پالس با عرض ۹۰ فمتوثانیه..... ۹۶

شکل ۳-۹: محدوده طیفی موج تراهرتز تولیدی برای تفاضل فرکانسی..... ۹۶

شکل ۳-۱۰:خروجی پالس های بسامد مجموع و هارمونیک دوم..... ۹۷

شکل ۳-۱۱:a ساختار کامپوزیت فوتونیک با۴/ λ ساختار DBR b)ساختار کامپوزیـت فوتونیـک بـا طراحـی جدید DBR..... ۹۸

شکل ۳-۱۲: شماتیک ساختاریک بعدی فوتونیک در تولید امواج تراهرتز..... ۹۹

شکل ۳-۱۳: باند عبور برای ساختار a در یک رنج فرکانسی وسیع با پرتوفرودی با زاویه ۶۰ درجه..... ۱۰۰

شکل ۳-۱۴: : باند عبور برای ساختار a در یک رنج فرکانسی کوچک با پرتوفرودی با زاویه ۶۰ درجه..... ۱۰۰

شکل ۳-۱۵: باند عبور برای ساختار b در یک رنج فرکانسی وسیع با پرتوفرودی با زاویه ۶۰ درجه..... ۱۰۱

شکل ۳-۱۶: باند عبور برای ساختار b در یک رنج فرکانسی کوچک با پرتوفرودی با زاویه ۶۰ درجه..... ۱۰۱

شکل ۳-۱۷: : تولید امواج تراهرتز با تغییرات زاویه ای منبع..... ۱۰۲

شکل ۳-۱۸ ساختار کامپوزیت فوتونیک با لایه مرکزی فیبوناچی..... ۱۰۳

شکل ۳-۱۹: طیف خروجی ساختار کامپوزیت فوتونیک فیبوناچی تعمیم یافته به ازای n=4و n=8..... ۱۰۴

شکل ۳-۲۰: طیف خروجی ساختار کامپوزیت فوتونیک فیبوناچی..... ۱۰۵

شکل ۳-۲۱: طیف خروجی ساختار کامپوزیت فوتونیک فیبوناچی..... ۱۰۵

شکل ۳-۲۲: طیف خروجی ساختار کامپوزیت فوتونیک فیبوناچی اینه ای..... ۱۰۶

فهرست جداول

جدول ۳-۱: ضخامت لایه های دو ساختار شکل۳-۱۱..... ۹۸

جدول ۳-۲: تعداد لایه های دو ساختار شکل ۳-۱۱..... ۹۹

فصل اول:

بررسی منابع

۱-۱: امواج تراهرتز

امواج الکترومغناطیسی[۱] را نخستین بار ماکسول[۲] پیش بینی کرد و سپس هاینریش هرتز[۳] آن را با آزمایش به اثبات رساند. ماکسول پس از تکمیل نظریه الکترومغناطیس، از معادلات این نظریه شکلی از معادله موج را به دست آورد و نشان داد که میدان های الکتریکی و مغناطیسی هم می توانند رفتاری موج گونه داشته باشند. طبق معادلات ماکسول، میدان الکتریکی متغیر با زمان باعث ایجاد میدان مغناطیسی می شود و برعکس. بنابراین اگر یک میدان الکتریکی متغیر میدان مغناطیسی تولید کند، میدان مغناطیسی نیز میدان الکتریکی متغیر تولید میکند و این گونه، موج الکترومغناطیسی ساخته می شود و پیش می‌رود [۱].

امواج الکترو مغناطیسی بر حسب بسامدشان به دسته های گوناگونی تقسیم می شوند: امواج رادیویی، ریزموج، تراهرتز، فروسرخ(مادون قرمز)، نور مرئی، فرابنفش، پرتو ایکس و پرتو گاما. شکل ۱-۱ طیف امواج الکترومغناطیسی را بر حسب تغییرات بسامد نشان می دهد [۲].

تراهرتز که با نام های موج زیر میلیمتر[۴] یا پرتو T[۵] ، نیز شناخته می شود. ناحیه ای از طیف الکترومغناطیسی است که در بین ناحیه های فروسرخ و ریز موج قرار گرفته است. اگر چه اختلافاتی بر سر تعیین دقیق بسامد این نوع موج مشاهده می شود، اما عموما بر ناحیه ی بسامدی بین ۰/۳تا ۳ تراهرتز توافق وجود دارد. موقعیت طیف میدانی تراهرتز بین نواحی الکترونیکی و اپتیکی یا بهتر بگوییم ترکیبی از اپتیک و الکترونیک می باشد به این معنی که می توان از روش های الکترواپتیکی برای تولید، آشکارسازی و پردازش

---

[۱] Electromagnetic Waves

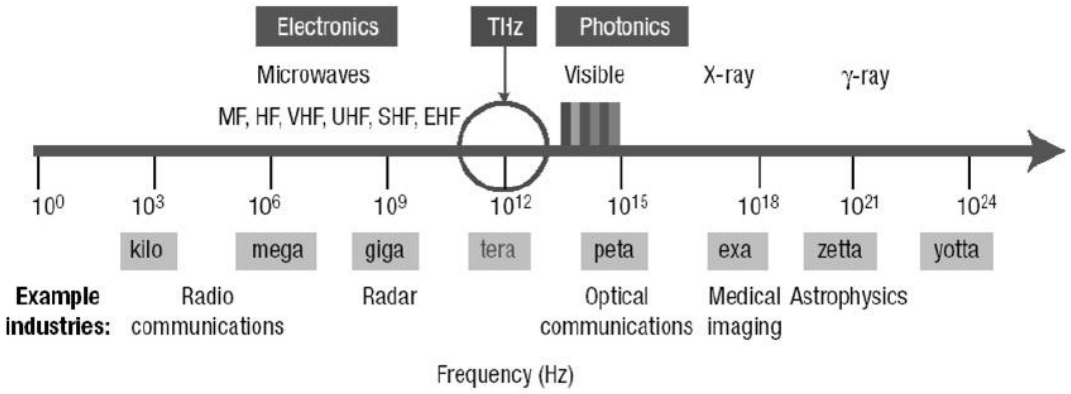
[۲] Maxwell

[۳] Heinrich Hertz

[۴] Sub-millimeter waves

[۵] T-Ray

امواج تراهرتز استفاده کرد[۳]



شکل ۱-۱: نمایش طیف الکترومغناطیسی. محدوده امواج تراهرتز با دایره نشان داده شده است

امواج تراهرتز پرتوهای مایکروویوی با طول موج های زیر میلیمتر هستند که یونیزه کننده بافت نمی باشند. این ویژگی امواج تراهرتز، سبب می شود که پرتوهای تراهرتز قابلیت نفوذ بالایی را در بازه وسیعی از مواد غیر هادی داشته باشند. به عنوان مثال امواج تراهرتز توانایی عبور از لباس، مقوا، چوب، پلاستیک، کاغذ، سرامیک و غیره را دارند، همچنین این امواج توانایی عبور از مه و ابرها را نیز داشته ولی توانایی نفوذ به آب و فلز را ندارند. از کاربرد های بسیار مهم برای امواج تراهرتز می تواب به: تصویربرداری های پزشکی، امنیت، کاربردهای فضایی، ارتباطات، ساخت و کنترل کیفیت اشاره کرد.

همان طور که بیان شد، امواج تراهرتز یونیزه کننده بافت نیستند، به همین علت به بافت ها و همچنین DNA برخلاف اشعه های ایکس آسیب نمی رسانند. برخی از فرکانس های تراهرتز می توانند تا حدود چند میلیمتر در بافت هایی با آب کم نفوذ کرده (بافت های چربی) و دوباره باز شوند، همچنین امواج تراهرتز می‌توانند تفاوت هایی که از لحاظ محتوای آبی و چگالی بافت ها وجود دارند را تشخیص دهند، در نتیجه می‌توان گفت امواج تراهرتز بهترین گزینه در پزشکی برای کشف و آشکار کردن توده های سرطانی می‌باشند. همچنین طیف سنجی بدست آمده از پرتوهای تراهرتز اطلاعات بدیعی را در زمینه شیمی و

بیوشیمی در اختیار ما قرار می‌دهد. امواج تراهرتز در مواردی مانند پلاستیک و پارچه قابلیت نفوذ دارند، به همین در می‌توانیم از این امواج در سیستم های امنیتی به عنوان سنسور تشخیص استفاده کنیم، لازم به ذکر است که دقت آشکارسازهای تراهرتز بسیار بالا می‌باشد و این امر سبب می‌شود که احتمال خطا در آشکارسازی هدف ها و موارد دیگر بسیار پایین آید به همین دلیل از امواج تراهرتز می توانیم در زمینه‌ی ساخت نیز استفاده کنیم. یعنی اینکه از حسگرها و آشکار سازهای تراهرتز که دارای دقت بالایی می باشند، می‌توان برای تعیین کیفیت، پایش فرآیند و رویه ساخت ادوات مختلف استفاده کرد. هم چنین پرتوهای تراهرتز این امکان را به باستان شناسان می‌دهند که هرگونه ترکیبات آلی را که در زیر پوشش‌های مختلف اعم از گچ، رنگ و ... قرار گرفته اند را تشخبص دهند. دیگر استفاده مهم پرتوهای تراهرتز در مخابرات می‌باشد. پتانسیل بالقوه ای که برای امواج تراهرتز در زمینه مخابرات وجود دارد مربوط به ارتباطات در ارتفاع بسیار بالا می‌شود. یعنی آنجایی که بخارهای آب منجر به جذب سیگنال ها نمی شود.

اگرچه امواج تراهرتز از آغاز شناخت مورد علاقه ی دانشمندان بوده اما در سه دهه ی اخیر تولید و استفاده از منابع همدوس تراهرتز مورد توجه واقع شده و امکان پذیر شده است. در طول این دوره، علم و فناوری گسترش زیادی پیدا کرده که شامل طیف گسترده ای از چشمه های تولید امواج تراهرتز و آشکارسازها می شود.

۱-۲: کاربرد های امواج تراهرتز

به دلیل انرژی کم فوتون امواج تراهرتز، این امواج موجب تحریک اتمی نمی‌گردند و همین امر موجب می‌شود بسیاری از امواج دی الکتریک که نسبت به نور مرئی شفاف نیستند، نسبت به امواج تراهرتز شفاف باشند.

علاوه بر این پرتوهای تراهرتز اتم ها را یونیزه نمی‌کنند. هنگامی که تصویربرداری تراهرتز در اواسط دهه ۱۹۹۰ میلادی در آزمایشگاه بل ارائه شد، صنعت بیشتر بر کاربرد این امواج در سیستم های اندازه‌گیری

متمرکز شد [۴] اما امروزه این امواج در زمینه های مختلف پزشکی، امنیتی و سیستم‌های تجاری نیز کاربرد دارند.

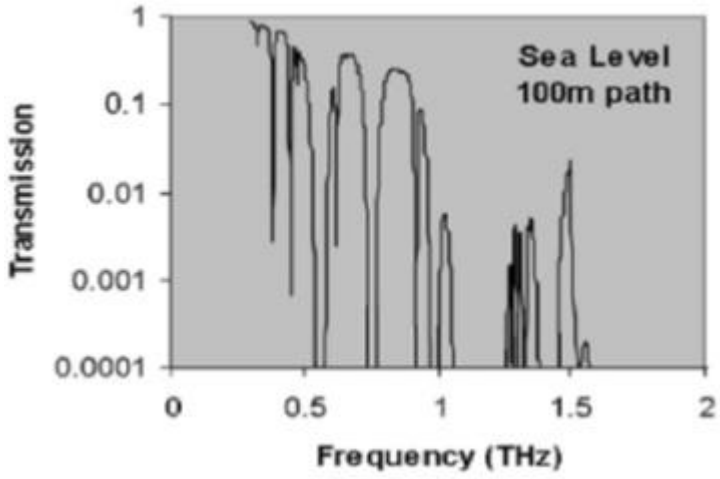
طول موج پرتو تراهرتز به اندازه کافی کوتاه است و از همین خاصیت برای تولید تصاویر دقیق از اشیا ماکروسکوپیک استفاده می شود. به عنوان مثال در برنامه های امنیتی برای اسکن و تشخیص وجود مواد منفجره و سلاح[۵, ۶]. . و در زمینه‌ی پزشکی برای تصویربرداری بدون ضرر در بافت های بدن انسان به جای استفاده از اشعه ایکس و همچنین تشخیص توده های سرطانی استفاده می‌شود [۷].

کاربردهای امنیتی و نظامی: داشتن طیف عبوری،جذبی و انعکاسی خوب این امواج در برخورد با انواع مواد از قبیل فلزات، داروها و انواع مواد منفجره، این امواج را به ابزار خوبی برای بازرسی افراد و بسته های مسافرتی در اماکن مهم از قبیل فرودگاه ها تبدیل کرد. شاید مهم ترین ویژگی امواج تراهرتز این باشد که به علت جذب تشدیدی در ساختارهای مولکولی، علاوه بر تصویربرداری می‌توان نوع ماده را نیز مشخص کرد.این‌کار مهم در سایر روش‌های آشکارسازی امکان پذیر نیست. به این ترتیب با ارسال و دریافت این امواج می‌توان از سلاح‌ها و نفر های استتار شده یا مین‌های پنهان شده در زیر خاک مطلع شد.یکی از مزایای امواج تراهرتز،تصویربرداری امنیتی از سلاح‌ها یا مواد منفجره مخفی شده بدون نیاز به اشعه ایکس می‌باشد[۶].

کاربردهای نظامی این ناحیه از امواج ممکن است با اندکی تاخیر حاصل شود زیرا کارایی چشمه‌ها و آشکارسازها هنوز محدود بوده و جاذبه هایی مانند بخارآب کاربردهای دوربرد آن را با چالش مواجه کرده است. اما برای استفاده در بالای اتمسفر زمین محدودیتی ندارند۰ در شکل (۱-۲) طیف جذب بخارآب در ارتفاع ۱۰۰ متر از سطح دریا در شرایط استاندارد اتمسفر نشان داده شده است. یک هدف دیگر از توسعه نظامی این امواج، قابلیت آن ها در ردیابی سلاح‌های شیمیایی و بیولوژیکی واقع در جو می‌باشد.

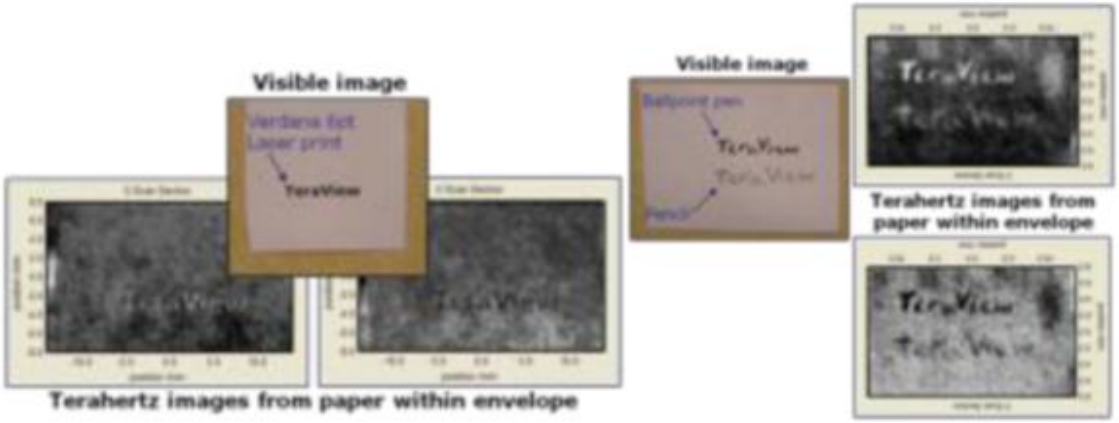
در خارج از فاصله ۱ الی ۱۰ تراهرتز جذب وجود ندارد ولی بین این فاصله جذب قابل ملاحظه است. چون غلظت بخارآب از ارتفاع ۲۰۰۰۰ کیلومتر به بالا به سرعت کاهش می‌یابد[۸] بنابراین این امواج تا

کیلومترها ارسال پذیر هستند. در این شرایط می‌توان برای شناسایی اشیا و هم چنین مخابرات تا اقصا نقـاط فضا استفاده کرد.



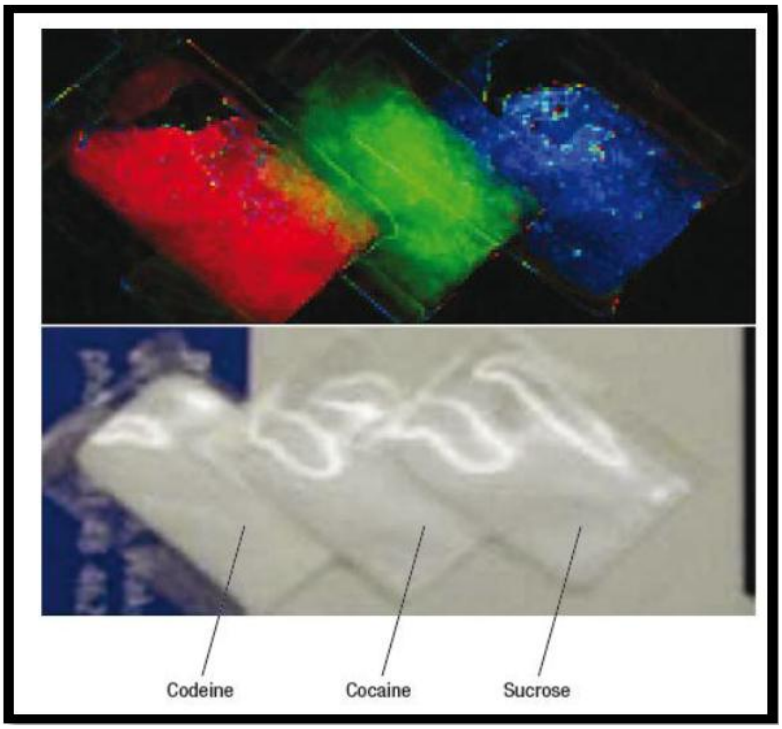
شکل ۱-۲: طیف جذب بخارآب در ناحیه تراهرتز

همچنین می‌توان از پالس تراهرتز برای تشخیص اشیای موجود در بسته های پستی و نیز مطالعه‌ی مـتن نامه بدون باز کردن آن در مصارف امنیتی استفاده کرد[۹].



شکل ۱-۳: استفاده از امواج تراهرتز در برنامه های امنیتی: متن نوشته شده در نامه‌ی درون پاکت، توسط امواج تراهرتز خوانده شده است. شکل سمت چپ متن نوشته شده با چاپگر لیزر ی، شکل سمت راست متن نوشته شده باخودکار و مداد.

پرتو تراهرتز یک ابزار طیف سنجی بسیار قوی است. طیف سنجی با دامنه زمان تراهرتز [۱] که به طور همزمان اطلاعات مربوط به فاز و دامنه مربوط به میدان تراهرتز را بدست می‌آورد، در زمینه های مختلف از قبیل تعیین خواص مواد مختلف مانند خواص دی الکتریک گرافن و شناسایی عوامل شیمیایی مانند مواد مخدر به کار برده می‌شود [۱۰]. طیف سنجی ترکیبی دو موج[۲] با کیفیت تصویر برداری بالا از خطوط چرخشی مولکولی و خطوط ساختار اتم یا یون، یک ابزار قدرتمند برای کاوش در فضای میان ستاره ای و همچنین جو سیاره ها از جمله زمین است. به کار بردن امواج تراهرتز در این زمینه بسیار مفید است.



شکل ۱-۴: استفاده از امواج تراهرتز در برنامه های امنیتی و تشخیص مواد مخدر.تصویربرداری به وضوح سه نوع پودر کدئین، کوکائین و ساکارز که در پاکت پنهان شده را از هم تشخیص می‌دهد

امروزه کاربرد های این قسمت از امواج الکترومغناطیسی، در چشمه های تابشی کارآمد و سامانه های

[۱] Terahertz Time Domin Spectroscopy

[۲] Heterodyne Spectroscopy