بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

تحلیل، طراحی و شبیه‌سازی آنتن‌های تراهرتز در حالت پالسی و موج‌پیوسته

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات(میدان)

رامین عمادی

استاد راهنما

دکتررضا صفیان

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد رشته مخابرات گرایش میدان آقای رامین عمادی

تحت عنوان

تحلیل، طراحی و شبیه‌سازی آنتن‌های تراهرتز در حالت پالسی و موج‌پیوسته

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱-استادراهنمای پایان‌نامه	دکتر رضا صفیان
۲-استادداور	دکتر ابوالقاسم زیدآبادی‌نژاد
۳-استادداور	دکتر ذاکرحسین فیروزه
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمدعلی خسروی‌فرد

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین.

از پدر و مادر عزیزم...این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاوری بی‌چشم‌داشت برای من بوده‌اند؛

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر رضا صفیان که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از آقای سید اسعد امیرحسینی نیز بخاطر راهنمایی‌ها و کمک بیدریغ ایشان کمال تشکر و قدردانی را دارم. از آقای نوید بارانی نیز بخاطر کمک‌های موثر ایشان نیز تشکر می‌کنم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکـــارات و نوآوریهـای ناشی از تحـــقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که اسوه‌ای از صبر و شکیبایی و تجسمی از لطف و مهربانی بوده و با متانت نگاهشان عزمم را جزم و اراده‌ام را استوار نمودند.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ ساختار کلی پایان‌نامه ۴

فصل دوم: مروری بر تاریخچه تشعشع تراهرتز

۲-۱ آشنایی با تشعشع تراهرتز ۷

۲-۲ تاریخچه تراهرتز-از گذشته تاکنون ۱۱

۲-۳ منابع تراهرتز و مقایسه آن‌ها ۱۶

فصل سوم: معادلات بنیادی نیمه‌هادی در تولیدجریان فوتوالکتریک و مواد مورداستفاده برای منابع تراهرتز

۳-۱ مقدمه ۱۸

۳-۲ معادلات بنیادی نیمه‌هادی ۱۸

۳-۲-۱ معادله پواسون ۱۹

۳-۲-۲ معادلات پیوستگی حامل‌ها ۱۹

۳-۲-۳ معادلات انتقال ۲۰

۳-۲-۴ معادله چگالی جریان ۲۲

۳-۳ اصول تئوری آماره حامل ۲۲

۳-۳-۱ آماره فرمی-دیراک و بولتزمن ۲۲

۳-۳-۲ چگالی موثر حالت‌ها ۲۳

۳-۳-۳ غلظت حامل ذاتی ۲۴

۳-۴ مدل انتقال توازن انرژی ۲۵

۳-۴-۱ معادلات توازن انرژی ۲۵
۳-۴-۲ نرخ‌های چگالی انرژی تلف‌شده ۲۸
۳-۴-۳ تحرک‌پذیری‌های وابسته به انرژی ۲۹
۳-۴-۴ شرایط مرزی توازن انرژی ۳۰
۳-۵ مواد مورداستفاده برای ساخت منابع تراهرتز ۳۰
۳-۵-۱ انتخاب ماده زیربنا برای آنتن‌های تراهرتز ۳۱
۳-۵-۲ تکنیک ساخت مواد فوتورسانای تراهرتز و مقایسه خواص آن‌ها ۳۲
۳-۶ ماده مورداستفاده برای الکترودهای آنتن ۳۵
۳-۷ نتیجه‌گیری ۳۶
فصل چهارم: آنتن‌های فوتورسانا
۴-۱ مقدمه ۳۷
۴-۲ ساختار آنتن فوتورسانا ۳۷
۴-۳ مدل‌سازی و فرمول‌بندی آنتن فوتورسانا ۳۹
۴-۴ شبیه‌سازی آنتن فوتورسانا ۴۳
۴-۴-۱ تحلیل پارامتری ۴۶
۴-۵ شبیه‌سازی آنتن فوتورسانا با درنظرگرفتن معادلات حرارت ۵۴
۴-۶ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی و تحلیلی ۵۵
۴-۷ تحلیل الکترومغناطیسی آنتن فوتورسانا ۵۵
۴-۸ نتیجه‌گیری ۶۱
فصل پنجم: فوتومیکسرها
۵-۱ مقدمه ۶۳
۵-۲ روند رشد تکنولوژی فوتومیکسینگ ۶۳
۵-۳ بررسی تکنیک فوتومیکسینگ و فرمول‌بندی آن ۶۵

۵-۴ شبیه‌سازی فوتومیکسر ۶۸
۵-۴-۱ شبیه‌سازی فوتومیکسر با ناحیه شکاف خالی (از الکترودها)..... ۶۹
۵-۴-۲ شبیه‌سازی فوتومیکسر برای اشکال مختلف الکترودها در ناحیه فعال..... ۷۶
۵-۵ آنالیز طراحی آنتن ۷۷
۵-۶ نتیجه‌گیری ۸۰
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۶-۱ نتیجه‌گیری ۸۲
۶-۲ پیشنهادها..... ۸۴
مراجع ۸۵

چکیده

آنتن‌های تراهرتز فوتورسانا از متداول‌ترین ادوات در سیستم‌های تراهرتز هستند. در این ادوات روش مورداستفاده برای تولید و آشکارسازی امواج تراهرتز عبارتست از تحریک‌کردن یک آنتن فوتورسانا با پالس‌های اپتیکی فوق‌العاده کوتاه که ساختار آنتن روی یک زیربنا از جنس فوتورسانا قرار می‌گیرد و الکترودهای آن بوسیله یک ولتاژ جریان‌مستقیم تغذیه می‌شوند. پالس‌های لیزر حامل‌های باردار را در زیربنا که روی آنتن فلزی رفت‌وبرگشت می‌کنند به حرکت درآورده تا ضمن تولید جریان الکتریکی، یک سیگنال را در باند تراهرتز تشعشع یا آشکارسازی کنند. بنابراین تحلیل یک آنتن فوتورسانا نیازمند حل همزمان معادلات فیزیک نیمه‌هادی و معادلات ماکسول می‌باشد. در این پایان نامه ابتدا به معرفی منابع مختلف تولید امواج تراهرتز و مزایا و معایب و قابلیت‌های آن‌ها پرداخته شده سپس آنتن‌های فوتورسانا مورد بررسی قرار گرفته که بیشترین میزان کاربرد را در تولید امواج تراهرتز دارند. با انجام تحلیل‌ها و همچنین شبیه‌سازی‌های مختلف عوامل موثر در بهبود عملکرد آن‌ها شناسایی و چگونگی عملکرد بهتر آن‌ها بیان شده است. برای طراحی مناسب و قابل اطمینان، تحلیل و طراحی و مدل‌سازی این آنتن‌ها به شیوه‌ای دقیق و بدون هرگونه تقریب معمول صورت گرفته است. به دلیل نحوه کارکرد این آنتن‌ها و همچنین داشتن دقت بالا در طراحی آن‌ها، در این پایان‌نامه از دو ابزار شبیه‌سازی مختلف برای مدل‌سازی آن‌ها استفاده شده است. از نرم‌افزار الکترونیک‌نوری بمنظور یافتن دقیق شدت اپتیکی جذب‌شده و نرخ تولید اپتیکی حامل‌ها درون زیربنا از طریق حل یک مساله پراکندگی نوری استفاده می‌شود. سپس معادلات حاکم بر انتقال حامل باردار درون زیربنا حل می‌شوند تا جریان فوتوالکتریک تراهرتز با درنظرگرفتن پارامترهای ماده بصورت واقع‌گرایانه بدست آید. از طریق نرم‌افزار الکترومغناطیسی تمام‌موج و با استفاده از جریان فوتوالکتریک محاسبه شده توسط نرم‌افزار الکترونیک‌نوری، پارامترهای آنتن و توان تراهرتز تشعشع‌شده بدست می‌آیند. در طی روش شبیه‌سازی ارائه‌شده اثر پارامترهای آنتن تراهرتز روی جریان فوتوالکتریک تراهرتز برای ناحیه فعال با ساختارهای هندسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: ۱-تراهرتز ۲-آنتن فوتورسانا ۳-فوتوالکتریک ۴-الکترونیک‌نوری

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

محدوده فرکانسی تراهرتز از طیف امواج الکترومغناطیسی در محدوده ۱۰۰ گیگاهرتز تا ۱۰ تراهرتز که در واقع بین طول‌موج‌های میلیمتری و مادون قرمز-دور[۱] قرار می‌گیرد. در مقایسه با بسیاری از نواحی طیف الکترومغناطیسی دیگر بعلت نبود منابع و آشکارسازهای منسجم و همدوس در فرکانس‌های تراهرتز، پیشرفت‌های علمی و فناوری به میزان زیادی در ناحیه تراهرتز محدود شده است. اگرچه این منابع در فرکانس‌های مادون‌قرمز و مایکروویو نسبت به فرکانس‌های تراهرتز بسیار پیش‌پاافتاده هستند اما منابع مادون‌قرمز و مایکروویو را نمی‌توان بسادگی تغییر داد تا در فرکانس‌های تراهرتز نیز کار کنند. تشعشع تراهرتز یون‌زا نیست و نسبت به امواج مایکروویو طول‌موج کوتاه‌تری دارند و از این‌رو قدرت تفکیک بالاتری نسبت به آن‌ها دارند و این امواج نسبت به امواج مایکروویو کمتر توسط اکثر مواد متداول جذب می‌شوند.

تکنیک فوتومیکسینگ در ابتدا تقریبا چهار دهه پیش برای تولید تشعشع همدوس در ناحیه مایکروویو ارائه شد. در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ کار اولیه تحقیقات روی امواج تراهرتز، با مطالعه پاسخ فوتورساناها به لیزرهای پالسی شروع شد[۴-۱]. در اواخر دهه ۱۹۸۰ استفاده از آنتن‌های فوتورسانا موجب تولید نمونه اصلی و اولیه آشکارساز و ساطع‌کننده موج تراهرتز پالسی شد[۵, ۶] و یک چنین ادواتی برای آشکارسازی و تولید تشعشع تراهرتز بطور وسیعی مورد استفاده قرار گرفتند.

---

[۱] Far-Infrared

آنتن‌های فوتورسانا[۱] تشعشع‌کننده‌هایی هستند که با موج اپتیکی تحریک می‌شوند[۷,۸] و قادرند تا متوسط توان تراهرتز نسبتا بزرگی که بیشتر از ۴۰ میکروووات[۹] و پهنای باند ۱۰ تراهرتز را نیز دارا باشند[۱۰]. بیشترین مواد مورداستفاده برای آنتن‌های فوتورسانا، گالیم‌آرسناید نیمه‌عایق[۲][۱۱ ,۹] و هم چنین گالیم‌آرسناید که با دمای پایین رشد یافته است[۳] [۱۳ ,۱۲] می‌باشند. یک آنتن فوتورسانا شامل یک نیمه‌هادی می‌باشد که دو الکترود به آن وصل شده است. این نیمه‌هادی می‌تواند توسط یک ولتاژ خارجی تغذیه شود. محدوده فاصله بین الکترودها می‌تواند بین چندین میکرومتر تا چندین سانتی‌متر باشد. این چنین تکنیکی ابتدا توسط آستون[۴] ایجاد شد و بعد از آن این تکنیک توسط گریش‌کاوسکی[۵] به یک طیف‌سنج فضای آزاد توسعه داده شد.

فوتومیکسینگ[۶] که بعنوان تبدیل هیترودواین اپتیکی شناخته می‌شود شیوه‌ای برای تولید تشعشع تراهرتز موج‌پیوسته کارآمد است که در آن خروجی دو لیزر تک مود یا خروجی یک لیزر دارای دو مود با فرکانس‌های مرکزی مختلف در یک محیط غیرخطی مانند فوتورسانا[۷] ترکیب می‌شوند. سیستم بگونه‌ای طراحی می‌شود که اختلاف فرکانس لیزرها در محدوده تراهرتز قرار گیرد[۱۴]. موج تراهرتز تولیدی می‌تواند به یک آنتن یا موجبر مجتمع‌شده با آن کوپل شود. در اوایل دهه ۱۹۹۰ نزدیک به یک دهه پس از به نمایش گذاشتن اولین تولید تشعشع تراهرتز پالسی با استفاده از مواد فوتورسانا، طراحی یک فوتومیکسر برای تولید موج تراهرتز موج‌پیوسته توسط گروه براون[۸] در دانشگاه MIT در سال ۱۹۹۳ گزارش شد[۱۵]. گروه مشابهی به یک دستگاه فوتومیکسر با توان تراهرتز معقولی در سال ۱۹۹۵ دست یافتند[۱۶]. پس از آن در سال ۱۹۹۷ مات‌سورا[۹] طراحی یک فوتومیکسر ساده‌تر را براساس لیزرهای کم‌هزینه ارائه کرد[۱۷]. با وجود این روش‌های آشکارسازی در آن موارد مبتنی بر بلومتر[۱۰] ترکیب سیلیکون است که خروجی‌ها تنها زمانی که فرکانس آنها بالاتر از ۳ تراهرتز است، قادر به اندازه‌گیری هستند[۱۸]. در اوایل سال ۱۹۹۸ ورقیز[۱۱] آشکارسازی هیترودواین را به همراه فوتومیکسرهای کوپل شده با آنتن که قادر به اندازه‌گیری محدوده فرکانسی ۲۵ گیگاهرتز تا ۲ تراهرتز بودند ارائه کرد[۱۹]. پس از این کارهای پیشگام در تحقیقات بیشتر امکان بهبود عملکرد فوتومیکسر و پیاده‌سازی آن برای کاربردهای مختلف را فراهم ساخت.

---

[۱] Photoconductive Antennas(PCAs)
[۲] Semi-Insulating GaAs(SI-GaAs)
[۳] Low Temperature Grown-GaAs(LTG-GaAs)
[۴] Auston
[۵] Grischkowsky
[۶] Photomixing
[۷] Photoconductor
[۸] Brown
[۹] Matsuura et al.
[۱۰] bolometer
[۱۱] Verghese et al.

تکنیک تولید تشعشع تراهرتز بطور وسیعی در ۳۰ سال اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل‌های محاسباتی قبلی [۱۴,۲۰] برای سوئیچ‌های فوتورسانا تراهرتز از یک پروفایل گوسی از پیش تعیین‌شده برای پالس اپتیکی تحریک استفاده می‌کردند که ممکن است برای آنتن‌ها با ساختارهای الکترود پیچیده و ساختار شکاف‌های مختلف دقیق نباشد. در اکثر مدل‌های تحلیلی فرض می‌شود که میدان الکتریکی بصورت یکنواخت و ثابتی در ناحیه فعال دستگاه توزیع شده است اما این فرض در همه شرایط نتایج درستی به بار نمی‌دهد. اثر پارامترهای مختلف روی جریان فوتوالکتریک تراهرتز اخیرا در مرجع [۲۱] ارائه شده است و در آن پالس‌های لیزر اپتیکی بصورت گوسی فرض شده‌اند.

۱-۲ ساختار کلی پایان‌نامه

در این پایان‌نامه سعی کرده‌ایم که آنتن‌های فوتورسانا و فوتومیکسرها را بصورت دقیق مدل‌سازی کنیم و اثر پارامترهای مختلف را روی جریان فوتوالکتریک براساس یک روش محاسباتی ترکیبی[۱] درنظر بگیریم تا نتایج دقیق‌تر و موثرتری نسبت به مدل‌های تحلیلی برای آنتن‌های فوتورسانا و فوتومیکسرها بدست آید. بنابراین در این پایان‌نامه یک روش شبیه‌سازی ترکیبی که در آن یک نرم‌افزار الکترونیک‌نوری(Silvaco and Sentaurus) به همراه یک شبیه‌ساز الکترومغناطیسی تمام‌موج(CST) ترکیب می‌شوند تا آنتن‌های فوتورسانا و فوتومیکسرها را بطور دقیق مدل‌سازی کنند. نرم‌افزارهای الکترونیک‌نوری بمنظور یافتن دقیق شدت اپتیکی و متعاقب آن نرخ تولید حامل با درنظر گرفتن پراکندگی اپتیکی از لبه فلزی شکاف، بکار گرفته می‌شوند. همچنین از این نرم‌افزارها بمنظور حل یک مجموعه از معادلات رانش-نفوذ بمنظور دستیابی به جریان فوتوالکتریک تراهرتز تولیدی درون ناحیه شکاف فوتورسانا برای نواحی فعال با ساختار هندسی مختلف برای الکترودها از جمله ناحیه فعال خالی از الکترود[۲]، الکترودهای اینتردیجیتال شش‌تایی[۳] و الکترودهای مستطیلی قله‌به‌قله شش‌تایی[۴] استفاده می‌شود. علاوه بر این با بررسی اثرات پارامترهای مختلف دستگاه روی جریان فوتوالکتریک تراهرتز و توان تشعشع‌شده توسط روش شبیه‌سازی ترکیبی، یک مطالعه پارامتری روی فاکتورهای مختلف طول‌عمر حامل ماده زیربنا، چگالی توان اپتیکی تابشی، ولتاژ تغذیه اعمالی و اندازه شکاف فوتورسانا انجام شده است. جریان فوتوالکتریک تولیدشده توسط نرم‌افزارهای الکترونیک‌نوری بعنوان یک منبع جریان برای تحریک آنتن بکار می‌رود. در نهایت توان تراهرتز تشعشع‌شده و پارامترهای آنتن با بخدمت گرفتن نرم‌افزار CST محاسبه می‌شوند.

---

[۱] Hybdid Computational
[۲] Bare Gap Electrode
[۳] Six Finger Interdigitated Electrodes
[۴] Six Finger Tip To Tip Electrodes

در فصل دوم در مورد تاریخچه منابع تراهرتز و روند روبه رشد آن‌ها صحبت شده است. همچنین خصوصیات امواج تراهرتز و کاربردهای این امواج در حوزه‌های مختلف بیان می‌شوند. در واقع در این فصل با چالش‌های مختلفی که برای تولید و توسعه منابع تراهرتز وجود داردآشنا می‌شویم و مزایا و معایب روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند و بسته به کاربرد خاص منابع تراهرتز مختلفی انتخاب می‌شوند.

در فصل سوم ابتدا با معادلات حاکم بر نیمه‌هادی‌ها آشنا می‌شویم و در واقع هدف اصلی این فصل آشنایی با مدل‌های مختلف و پارامترهای متنوعی که ماده به نحو واقع‌گرایانه برحسب آن‌ها توصیف می‌شود، می‌باشد. آشنایی دقیق با این معادلات کاربر را در حین کارکردن با نرم‌افزارهای الکترونیک‌نوری بکار گرفته‌شده در این پایان‌نامه کمک خواهد کرد. سپس در انتهای این فصل درباره مواد مختلفی که بعنوان زیربنا برای منابع تراهرتز مورد استفاده قرار می‌گیرند، صحبت می‌شود و مختصرتوضیحی در مورد شیوه ساخت این مواد ارائه می‌شود.

در فصل چهارم به تحلیل و طراحی آنتن‌های فوتورسانا در مود پالسی پرداخته شده است. ابتدا از یک مدل تحلیلی تقریبی برای نشان دادن وابستگی جریان فوتوالکتریک به پارامترهای مختلف تحت بررسی استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار Silvaco به شبیه‌سازی جریان فوتوالکتریک پرداخته شده است و اثر پارامترهای مختلف روی آن مورد بررسی قرار گرفته است. سعی شده است پس از بررسی پارامتری آنتن‌های فوتورسانا مقادیر مطلوب برای پارامترها انتخاب شود بنحوی که جریان فوتوالکتریک تولیدی حداکثر شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار CST برای شبیه‌سازی آنتن دوقطبی[۱] و جریان فوتوالکتریک بدست آمده از مرحله قبل بعنوان منبع تحریک آن، به محاسبه تشعشع تراهرتز تولیدی پرداخته شده است.

در فصل پنجم به تحلیل و طراحی فوتومیکسرها در مود موج‌پیوسته پرداخته شده است. ابتدا اصول فوتومیکسینگ تشریح شده و سپس با ارائه یک مدار معادل برای منبع فوتومیکسر و آنتن مجتمع‌شده با آن، محدودیت‌های این تکنیک بررسی شده‌اند. در این فصل از نرم‌افزار Sentaurus برای شبیه‌سازی جریان فوتوالکتریک استفاده شده است. سپس اثر پارامترهای مختلف روی دامنه جریان فوتوالکتریک تولیدی بررسی شده است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار CST یک آنتن دوقطبی با فرکانس رزونانس ۰/۵ تراهرتز طراحی شده است و مقاومت ورودی آنتن در این فرکانس محاسبه شده و با تحریک کردن آنتن با جریان فوتوالکتریک بدست‌آمده از مرحله قبل، توان تشعشع‌شده تراهرتز محاسبه شده است.

در فصل ششم به بحث و نتیجه‌گیری از این پایان‌نامه پرداخته شده و همچنین برای کارهای آینده در این حوزه پیشنهاداتی ارائه شده است. با توجه به اینکه حوزه تراهرتز به یکی از حوزه‌های فعال تحقیقاتی در قرن اخیر

[۱] Dipole Antenna

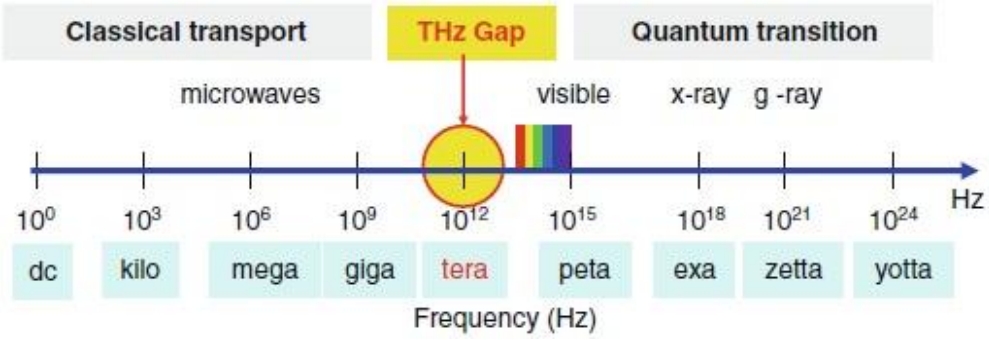
تبدیل شده است آشنایی با مباحث و چالش‌های این حوزه می‌تواند به خوانندگان کمک بسیاری کند. همچنین در این فصل پیشنهاداتی برای توسعه کارهای قبلی ارائه شده است که می‌تواند به توسعه هرچه بیشتر جنبه‌های مختلف این حوزه کمک کند.

فصل دوم

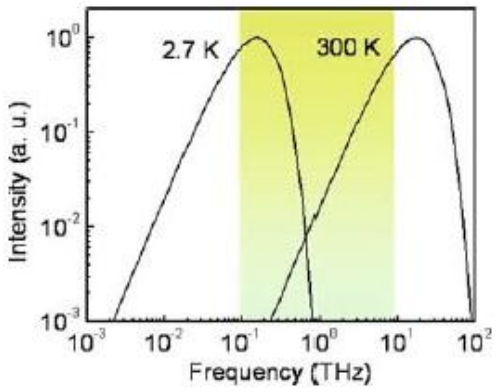
مروری بر تاریخچه تشعشع تراهرتز

۲-۱ آشنایی با تشعشع تراهرتز

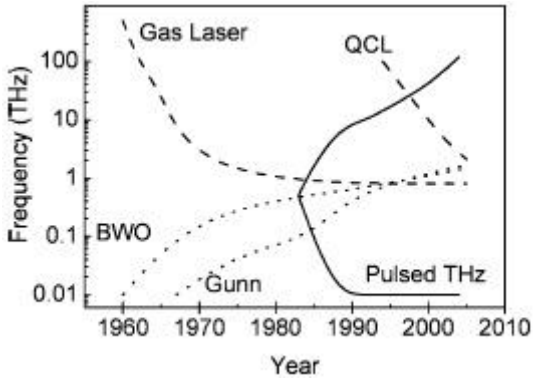
بین فرکانس‌های مایکروویو و مادون‌قرمز تشعشع تراهرتز قرار می‌گیرد(شکل(۲-۱)). به شیوه مشابهی که نور مرئی یک تصویر ایجاد می‌کند و امواج رادیویی می‌توانند صوت را منتقل کنند و اشعه ایکس برای دیدن اشکال درون بدن انسان بکار می‌رود امواج تراهرتز(اشعه‌های تی نیز نامیده می‌شوند) می‌توانند تصاویر تولید کنند و همچنین اطلاعات را انتقال دهند. منابع تراهرتز فراوانی در اطراف ما هستند از تشعشع پس‌زمینه کیهانی گرفته تا تشعشع جسم سیاه در دمای اتاق. اکثر این منابع تراهرتز ناهمدوس هستند و بسختی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. با وجود این بخش بزرگی از طیف تراهرتز بطور خاص مفید نیست زیرا آن‌ها نه ساطع‌کننده‌های مناسبی برای ارسال سیگنال‌های تراهرتز کنترل‌شده هستند و نه سنسورهای کارآمدی برای جمع‌آوری آن سیگنال‌ها و ثبت اطلاعات هستند. درنتیجه بخشی از طیف الکترومغناطیسی تراهرتز شکاف تراهرتز نامیده می‌شود. شکل(۲-۲) تشعشع زمینه کیهانی و تشعشع جسم سیاه را در دمای اتاق نشان می‌دهد و مرز تاریک باند تراهرتز را به نمایش می‌گذارد. بعلت توسعه تحقیقات در مورد تکنولوژی‌های مربوط به تراهرتز تشعشع تراهرتز کاربردهای بالقوه گسترده‌ای در پزشکی، میکروالکترونیک، کشاورزی، علم قانون و دادگاه و بسیاری از حوزه‌های دیگر پیدا کرده است. شکل(۲-۳) مسیر توسعه منبع تراهرتز همدوس را نشان می دهد.



شکل(۲-۱): طیف الکترومغناطیسی. توسعه ساطع‌کننده‌ها و آشکارسازهای کارآمد در هر رژیم طیفی منجر به ظهور صنایع عظیمی شده است[۲۲].



شکل(۲-۲): تشعشع زمینه کیهانی و تشعشع جسم سیاه را در دمای اتاق نشان می‌دهد. مرز تاریک باند تراهرتز را به نمایش می‌گذارد[۲۲].



شکل(۲-۳): مسیر توسعه منبع تراهرتز همدوس[۲۲].

در حوزه امواج الکترومغناطیس خصوصیات و رفتار امواج تراهرتز مشابه دیگر امواج توسط معادلات ماکسول توصیف می‌شوند. با وجود این بعلت موقعیت ویژه آن‌ها روی طیف الکترومغناطیسی کارکردن با امواج تراهرتز بسیار سخت‌تر از امواج مجاور آن‌ها است. از نظر تاریخی تحقیقات روی طیف الکترومغناطیسی به دو حوزه مختلف ۱)اپتیک ۲)الکترومغناطیس تقسیم شده است. جدول(۱-۱) نشان می‌دهد که اصول و روش‌ها و ابزارهای

مورد استفاده برای سروکار داشتن با امواج الکترومغناطیسی و امواج نورانی متفاوت است. با وجود این امواج تراهرتز بسادگی در یک چنین گروهی قرار نمی‌گیرند زیرا تقریب‌های بکارگرفته‌شده برای امواج نوری یا الکتریکی ممکن است هنوز در مورد رژیم امواج تراهرتز معتبر نباشد. اصول و روش‌ها و ابزارهای جدیدی باید بکار گرفته شود تا امواج تراهرتز قابل درک و قابل استفاده باشند. از آنجایی که امواج تراهرتز سطح انرژی فوتونی پایینی دارند تعادل حرارتی بسادگی می‌تواند تمایز بین دو حالت را که اختلاف انرژی آن برابر انرژی یک فوتون تراهرتز است محو کند.

طبیعت منحصربه فرد بودن امواج تراهرتز محققین را به توسعه این باند فرکانسی برای کاربردهای مختلف برانگیخته است.

- امواج تراهرتز سطح انرژی فوتونی پایینی دارند و بنابراین نمی‌توانند منجربه یونیزاسیون نوری در بافت‌های زیستی شوند در صورتی که اشعه ایکس[۱] می‌توانند این کار را انجام دهند. درنتیجه امواج تراهرتز هم برای فرد مورد آزمایش و هم برای اپراتور ایمن و بی خطر محسوب می‌شوند. بعلت جذب بسیار فوق‌العاده امواج تراهرتز توسط آب، این امواج نمی‌توانند به درون بدن انسان نفوذ کنند در صورتی که امواج مایکروویو می‌توانند به درون بدن انسان نفوذ کنند. بنابراین حتی اگر امواج تراهرتز هرگونه آسیبی به بدن برسانند به سطح پوست محدود می‌شود.
- امواج تراهرتز طول‌موج بلندتری نسبت به امواج مادون‌قرمز[۲] و مرئی دارند. این بدان معنی است که امواج تراهرتز کمتر تحت تاثیر پراکندگی مای[۳] قرار می‌گیرند. امواج تراهرتز نسبت به اکثر مواد دی‌الکتریک خشک مانند کاغذ، چوب و پلاستیک شفاف است. شکل(۲-۴):a) تصویر موج تراهرتز را از چوب راکت که در یک کیف پلاستیکی قرار گرفته نشان می‌دهد.
- در فرکانس‌های تراهرتز اکثر مولکول‌ها جذب قوی و پاشندگی بالایی بخاطر گذارهای نوساناتی و دورانی که دوقطبی‌ها این امکان را دارند، خواهند داشت. این گذارها برای مولکول‌ها خاصیت منحصربه فردی است و بنابراین طیف‌نما را قادر می‌سازد تا در محدوده تراهرتز عمل انگشت‌نگاری را انجام دهد. با ترکیب فناوری تصویرسازی، بازرسی و تفتیش با استفاده از امواج تراهرتز اطلاعاتی در مورد ترکیب و پروفایل هدف بدست می‌آید.

---

[۱] X-rays
[۲] Infra Red(IR)
[۳] Mie

- سیگنال‌های تراهرتز همدوس را می‌توان در حوزه زمان بوسیله نگاشت دامنه و فاز میدان الکتریکی گذرا آشکار کرد. این خصیصه دستیابی به طیف جذب و پاشندگی این امواج را ممکن می‌سازد.

شکل(۲-۴): (a)تصویری از راکت تنیس (b)تصویر راکت در یک پاکت پلاستیکی (c)تصویر موج تراهرتز(۰/۶ تراهرتز) از راکتی که در پاکت پلاستیکی قرار دارد[۲۲].

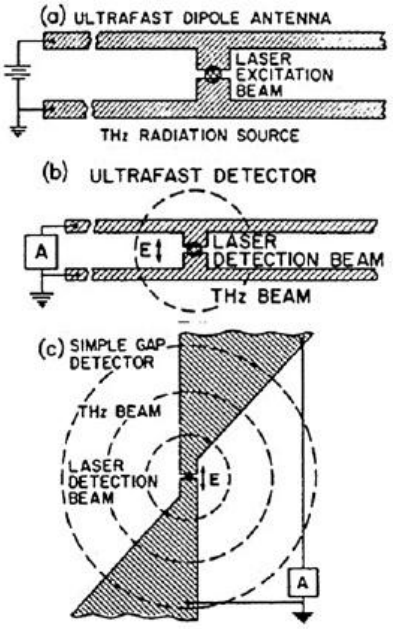
طیف‌نگاری حوزه‌زمان یک موج تراهرتز همدوس با پهنای‌باند فوق العاده وسیع روش جدیدی را برای مشخص ساختن خواص الکترونیکی، نوساناتی و ترکیبی اجسام جامد، مایع و گاز و همچنین شعله‌ها و جریان‌ها فراهم می‌کند. بسیاری از ترکیبات شیمیایی و زیستی اثر مشخصی در واکنش به امواج تراهرتز دارند که این موضوع بخاطر سطح انرژی دورانی و نوسانی مولکولی منحصربه فرد آن‌هاست که دلالت بر آن دارد که ترکیبات و ساخت‌های شیمیایی ممکن است با استفاده از یک باریکه تراهرتز مورد بررسی قرار گیرند. یک چنین قابلیتی می‌تواند برای تشخیص بیماری، آشکارساختن آلوده‌کننده‌ها، تشخیص عوامل شیمیایی، زیستی و کنترل کیفیت محصولات غذایی بکار رود. امکان تشخیص بمب‌های پلاستیکی از روی چمدان‌ها، لباس‌ها، وسایل خانگی معمول و تجهیزاتی که مبتنی بر ساختار مولکولی هستند بصورت کامل بوجود آمده است.

جدول(۱-۱): مقایسه حوزه اپتیکی و الکترومغناطیسی.

اپتیک	الکترومغناطیس	
امواج اپتیکی	امواج الکترومغناطیسی	نام امواج
معادلات شرودینگر	معادلات ماکسول	قوانین
گذار کوانتومی	جابجایی کلاسیکی	پرتوافکنی
شدت	میدان الکتریکی	کمیت اندازه‌گیری شده
لنز، آینه و فیبر	مدار، آنتن و موجبر	ابزار
محیط یکنواخت	میدان یکنواخت	تقریب بکارگرفته شده

۲-۲ تاریخچه تراهرتز- از گذشته تاکنون

در اواخر دهه ۱۹۸۰ استفاده از آنتن‌های فوتورسانا موجب تولید نمونه اصلی و اولیه آشکارساز و ساطع‌کننده موج تراهرتز پالسی شد[۵,۶] و یک چنین ادواتی برای آشکارسازی و تولید تشعشع تراهرتز بطور وسیعی مورد استفاده قرار گرفتند. شکل(۲-۵) ایده طرح آنتن‌های فوتورسانا را نشان می‌دهد[۸].



شکل(۲-۵): آنتن دن گریش‌کاوسکی[۱] که بعنوان ساطع‌کننده و آشکارساز موج تراهرتز بکار گرفته می‌شود. (a)آنتن دوقطبی فوق‌العاده سریع، (b)آشکارساز فوق‌العاده سریع و(c) آشکارساز شکافی ساده[۲۲].

مکانیزم‌های مختلفی برای تولید تشعشع تراهرتز مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند از جمله: شتاب دادن فوتون-حامل در آنتن‌های فوتورسانا، اثرات غیرخطی مرتبه‌دوم در کریستال‌های الکترواپتیک(EO)(یکسوسازی اپتیکی)، نوسانات پلاسما و خطوط انتقال غیرخطی الکترونیکی. هدایت بوسیله تابش فوتون و یکسوسازی اپتیکی متداول‌ترین راهکارها برای تولید باریکه‌های تراهرتز پالسی باندوسیع هستند. بازدهی تبدیل عملی برای یک چنین تکنیک‌هایی بسیار پایین است و متوسط توان تراهرتز در محدوده نانووات تا میکروووات است. در حالت کلی موادی که دارای ضریب غیرخطی مرتبه‌دوم بزرگی هستند میزان جذب آن‌ها برای امواج اپتیکی و تراهرتز پایین است درنتیجه نامزدهای مناسبی برای یک منبع تراهرتز هستند[۲۲].

با مقایسه دیگر تشعشع‌کننده‌های موج تراهرتز متداول، آنتن‌های فوتورسانا با زیربنای GaAs در اطراف ۵ تراهرتز جذب فونون ندارند که برای طیف‌نمایی باندوسیع خالی از شکاف و بالای ۷ تراهرتز کاملا مفید هستند. با

[۱] Dan Grischkowsky