

الله الرحمن الرحيم



دانشگاه شاهد
دانشکده فنی و مهندسی

سمینار دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق-مخابرات-میدان

بررسی مسائل مربوط به آنتن‌های تراهرتز

استاد راهنما:

دکتر غلامرضا داداش زاده

نام دانشجو

فاطمه نیک بخت

تابستان ۹۱

تقدیر و تشکر

بر خود واجب می‌دانم تا از راهنمایی‌ها و مشاوره‌های استاد گرانقدر آقای دکتر غلامرضا داداش زاده که مرا در انجام این پروژه یاری دادند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

چکیده

به منظور دستیابی به سرعت انتقال اطلاعات 10 Gb/s و یا بیشتر، سیستم‌های امروزی به علت کمی پهنای باند فرکانسی دارای محدودیت می‌باشند. به همین دلیل، نیاز به منابع طیفی جدیدی برای سیستم‌های مخابراتی بی سیم آینده با سرعت بالا، احساس می‌شود. کاندیداهای مختلفی نظیر سیستم‌های با پهنای باند زیاد (UWB)، فرکانس رادیویی در 60 گیگاهرتز، مخابرات نوری فضای آزاد (FSO) و تراهرتز برای استفاده در سیستم‌های بی سیم پیشنهاد شده‌اند.

تراهرتز غیر از کاربردهای محدود در کیهان‌شناسی، به علت محدودیت در وسایل و ادوات، تولید و آشکارسازی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌است. ظهور لیزرهای فمتوثانیه (Femto second) و آنتن‌های نور-رسانایی در دهه‌ی ۱۹۸۰ باعث کاربردی شدن تراهرتز در علوم پزشکی، علوم دارویی و کاربردهای امنیتی شد. با پیشرفت‌های جدید در وسایل تراهرتز، محدوده فرکانسی $3000-275$ گیگاهرتز توجه بسیاری از محققان را برای استفاده از آن در مخابرات بی سیم به خود جلب کرده‌است. محدوده‌ی فرکانسی تراهرتز به علت متمایز بودن رفتار مواد مختلف در این ناحیه، کم‌ترین مطالعات بر روی آن صورت گرفته‌است.

در این مطالعه به بررسی ویژگی‌های منحصر به فرد این ناحیه، شناخت موانع موجود و روش‌های تحلیل و آنالیز آنتن‌های ساخته شده در این باند فرکانسی، پرداخته شده‌است. همچنین پیشنهادهایی به منظور ارتقای پارامترهای آنتن‌های مورد مطالعه و همچنین ساخت آنتن‌هایی با بازده و توان بالاتر ارائه گردیده‌است.

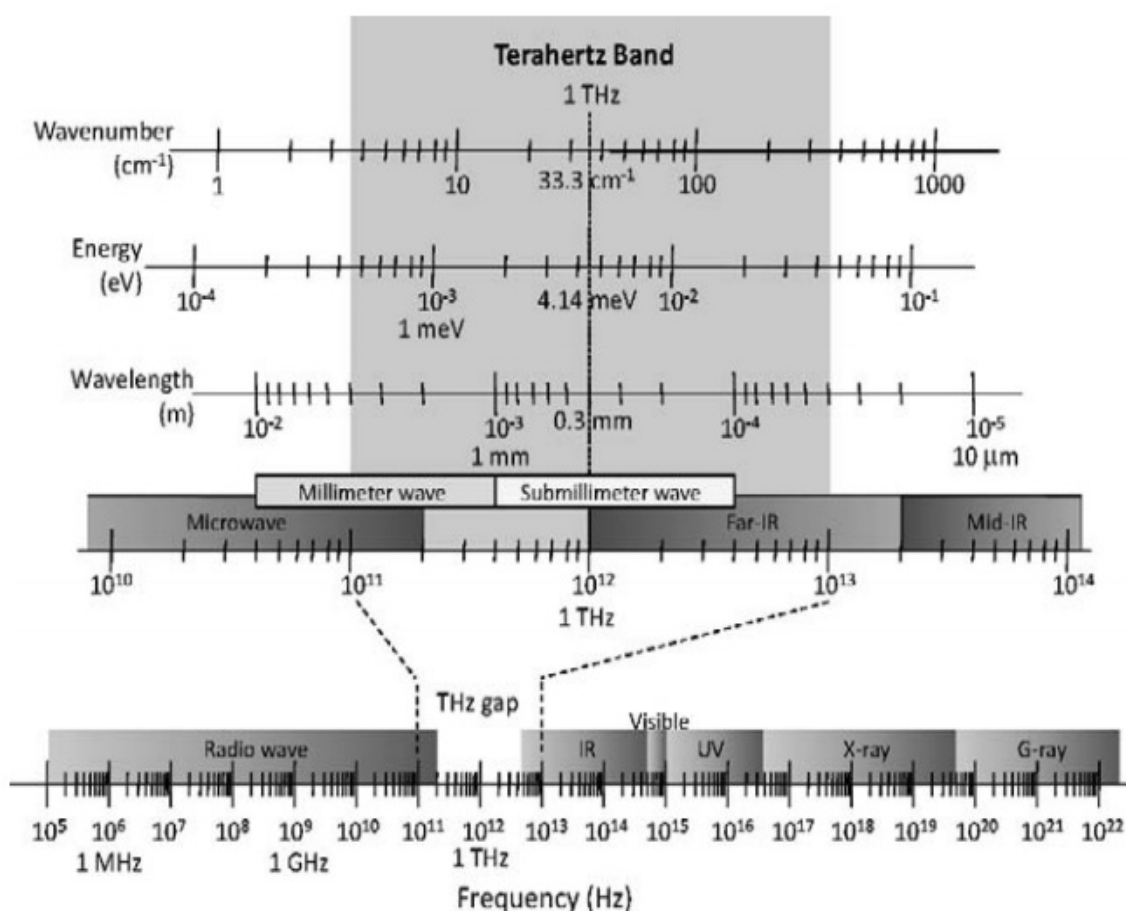
کلید واژه: آنتن تراهرتز، تکنولوژی موج زیرمیلیمتری.

فصل ۱- مقدمه‌ای بر آنتن‌های تراهرتز.....	۱
۱-۱- مقدمه	۱
۱-۲- معرفی باند فرکانسی تراهرتز.....	۲
۱-۳- روشهای تولید موج تراهرتز.....	۵
۱-۴- آشکارسازی تراهرتز.....	۵
فصل ۲- معرفی آنتن‌های نور-رسانایی.....	۷
۱-۲- آنتن نور-رسانایی.....	۷
۱-۲-۱- تولید موج تراهرتز در آنتن نور-رسانایی.....	۹
۱-۲-۲- ارتباط ساختار فیزیکی آنتن و عملکرد آن.....	۹
۱-۲-۳- تولید پالس براساس ولتاژ بایاس آنتن نور-رسانا.....	۱۱
۱-۲-۴- تفاوت آنتن‌های نور-رسانا با آنتن‌های معمولی.....	۱۷
۲-۲- بازده آنتن‌های نور-رسانا.....	۱۹
۳-۲- آنتن نور-رسانا میکرواستریپی با دو زیرلایه.....	۲۲
۱-۳-۲- آنتن موج آرام ۲۸	
فصل ۳- آنتن تراهرتز مجتمع.....	۳۰
۱-۳- آنتن مجتمع مخروطی تراهرتز.....	۳۰
۱-۳-۱- ساختار آنتن THz-TEMHA.....	۳۰
۲-۳- آنتن ضرب‌کننده نوری با محفظه مخروطی.....	۳۳
۳-۳- آنتن لنز سیلیکونی تغذیه شده با موجبر موج نشتی.....	۳۸
فصل ۴- بررسی پلاریزاسیون آنتنهای تراهرتز.....	۴۲
۱-۴- تشعشع چهارقطبی از آنتن تراهرتز دو قطبی.....	۴۴
فصل ۵- نتیجه گیری.....	۴۷
فصل ۶- پیشنهادات.....	۴۹

فصل ۱ - مقدمه‌ای بر آنتن‌های تراهرتز

۱-۱ - مقدمه

تقاضای روبه‌رشد در مخابرات بی‌سیم، به منظور استفاده از امکانات جدید؛ مانند دسترسی سریع به شبکه جهانی اینترنت، تلفن تصویری و امکان ارسال اطلاعاتی با حجم زیاد در بازه زمانی کوتاه؛ موجب شده‌است که نیازمند پهنای باند بیشتری برای سهولت استفاده از این امکانات باشیم. تکنولوژی تراهرتز یکی از روش‌های دستیابی به این امکانات می‌باشد.



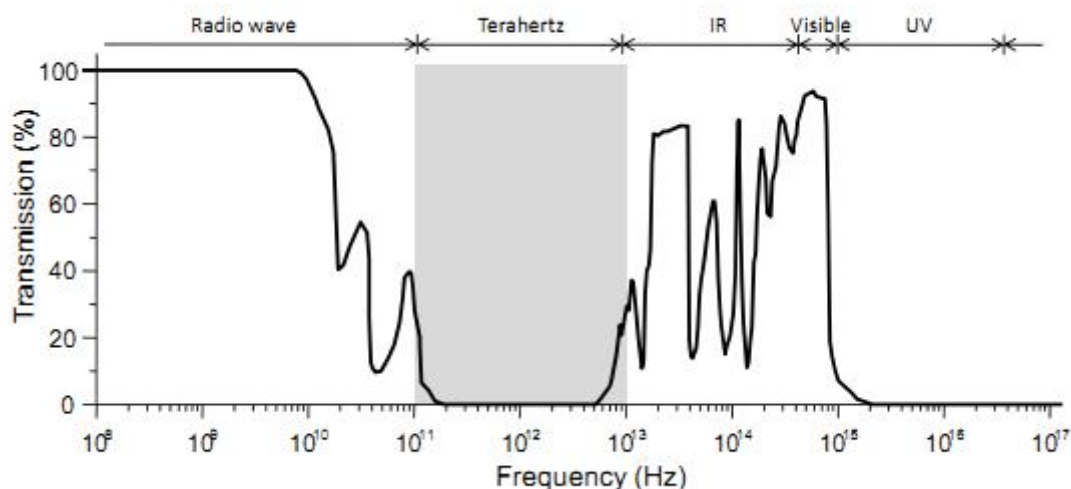
شکل ۱-۱- محل قرارگیری محدوده‌ی تراهرتز در طیف الکترومغناطیسی [۲]

میدان‌های تراهرتز به امواجی با طیف فرکانسی ۱۰-۱ تراهرتز (شکل ۱-۱) گفته می‌شود، که این طیف پس از ناحیه‌ی میکروویو و پیش از ناحیه‌ی مادون قرمز قرار دارد. البته در عمل فرکانس تراهرتز را از ۰/۱ تا ۱۰ THz در نظر گرفته می‌شود، که مشتمل بر امواج میلی‌متری و زیرمیلی‌متری می‌باشد. این

محدوده‌ی فرکانسی اهمیت علمی بالایی دارد؛ زیرا در ناحیه‌ی گذر از میکروفیزیک به تئوری کوانتومی میکروکاسمیک جای دارد و هم‌چنین طیف نوسان مولکولی پروتئین را پوشش می‌دهد. به منظور رسیدن به درک بهتری از این ناحیه‌ی فرکانسی ذکر این نکته ضروری است که در ناحیه تراهرتز، طول موج $3-0.3$ mm می‌باشد که مابین طیف موج میلی‌متری و موج نوری قرار گرفته‌است. بر روی ناحیه تراهرتز کم‌ترین مطالعات تاکنون صورت گرفته‌است. در واقع به دلیل ویژگی چند ماهیتی این ناحیه، تحقیقات بر روی آن نیازمند دانش عمیقی پیرامون فوتونیک، اپتیک، مهندسی میکروویو و فیزیک نیمه‌رساناها می‌باشد. هم‌چنین این طیف فرکانسی در علوم چون فیزیک نجومی، فیزیک پلاسما، طیف نگاری، تصویر برداری پزشکی، زیست‌شناسی و مخابرات کاربرد دارد [۱].

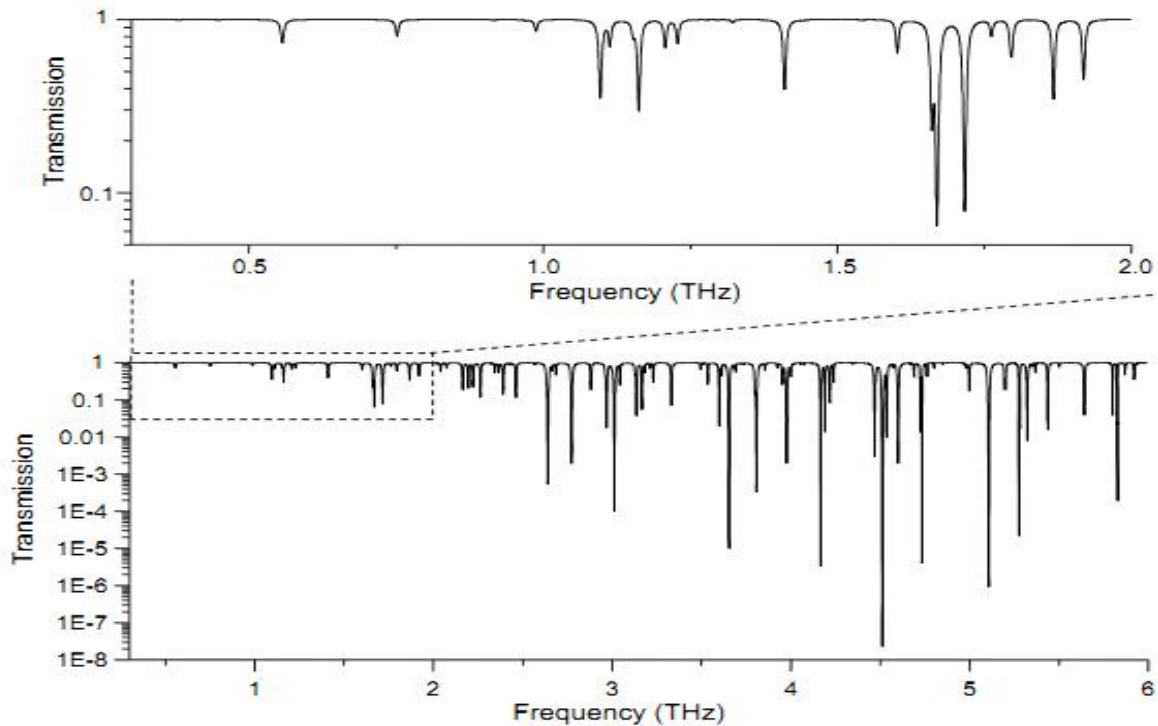
طیف موج تراهرتز در جایگاهی مابین الکترونیک و فوتونیک قرار گرفته‌است و به همین علت می‌توان از دانش اپتیک یا الکترونیک و یا تلفیقی از این دو برای تولید، آشکارسازی و اجرای فرآیندهایی بر روی این میدان‌ها استفاده نمود. به‌عنوان نمونه می‌توان از روش تبدیل نوری و یا روش نور-رسانایی^۱ میدان تراهرتز تولید نمود و آن را با موجبر مسطح هدایت نمود و یا از امواج منتشره در فضای آزاد به‌عنوان منبع برای آنتن استفاده نمود. هر چند که می‌توان از منابع کاملاً الکترونیکی مانند نوسان‌سازها و ضرب‌کننده‌ها و یا منابع نوری مانند لیزر برای تولید و دریافت میدان‌های تراهرتز استفاده نمود. علاوه بر این به دلیل قرار گرفتن طول موج تراهرتز مابین طول موجهای نوری و میکروویو، تکنیک‌های آنالیز و طراحی مرتبط با آن طیف‌ها ناحیه تراهرتز را نیز پوشش می‌دهد ولی برخی مسائل کاملاً منحصر به این طیف می‌باشد که موجب شده‌اند این ناحیه همچون سایر نواحی فرکانسی پیشرفت چشم‌گیری نکرده‌باشد.

۲-۱- معرفی باند فرکانسی تراهرتز



شکل ۲-۱- انتقال طیف‌های مختلف فرکانسی در فضای

ناحیه‌ی تراهرتز ویژگی‌های طیفی خاصی دارد که مرتبط با فرآیندهای اساسی فیزیک؛ مانند حرکت انتقالی مولکول‌ها، دامنه بزرگ حرکت لرزشی مواد آلی، حرکت لرزشی در جامدات و شکاف‌های انرژی در ابررساناها؛ می‌باشد. کاربردهای باند فرکانسی تراهرتز نیز مرتبط با این ویژگی‌های منحصر به فرد می‌باشد [۲].



شکل ۱-۳- میزان انتقال بخار آب در طیف تراهرتز [۲]

در مقایسه با دو ناحیه همجوار؛ یعنی ناحیه امواج رادیویی و مادون قرمز؛ ناحیه تراهرتز با توجه به خطوط دورانی مولکول‌های تشکیل‌دهنده‌اش از میزان کدورت بسیار بالایی در جو برخوردار است (شکل ۱-۲). در واقع، پدیده‌ی جذب به‌وسیله‌ی مولکول‌های بخار آب مهم‌ترین عامل میرایی موج تراهرتز در فضای آزاد می‌باشد. شکل ۱-۳ طیف انتقال بخار آب را با دقت زیاد نشان می‌دهد. در عمل، پدیده‌ی جذب آب مهم‌ترین عاملی است که در کاربردهای مربوط به باند تراهرتز می‌بایست به آن توجه ویژه‌ای شود.

بر اساس خواص نوری در باند فرکانسی تراهرتز، مواد چگال عمدتاً در یکی از این سه گروه قرار می‌گیرند: آب، فلز و دی‌الکتریک. آب بعنوان قوی‌ترین مایع قطبی بیشترین قدرت جذب را در ناحیه‌ی تراهرتز دارا می‌باشد. به دلیل هدایت الکتریکی بالا، فلزات بیشترین بازتابش را در این ناحیه دارند. مواد غیر فلزی و غیرقطبی هم-

چون کاغذ، پلاستیک، البسه، چوب و سرامیک که معمولاً در طول موج‌های نوری به‌عنوان ماده‌ی غیرشفاف در نظر گرفته می‌شوند در ناحیه‌ی تراهرتز شفاف می‌باشند. در جدول زیر؛ به طور اجمالی؛ به ویژگی‌های این سه دسته مواد، در باند فرکانسی تراهرتز پرداخته شده‌است.

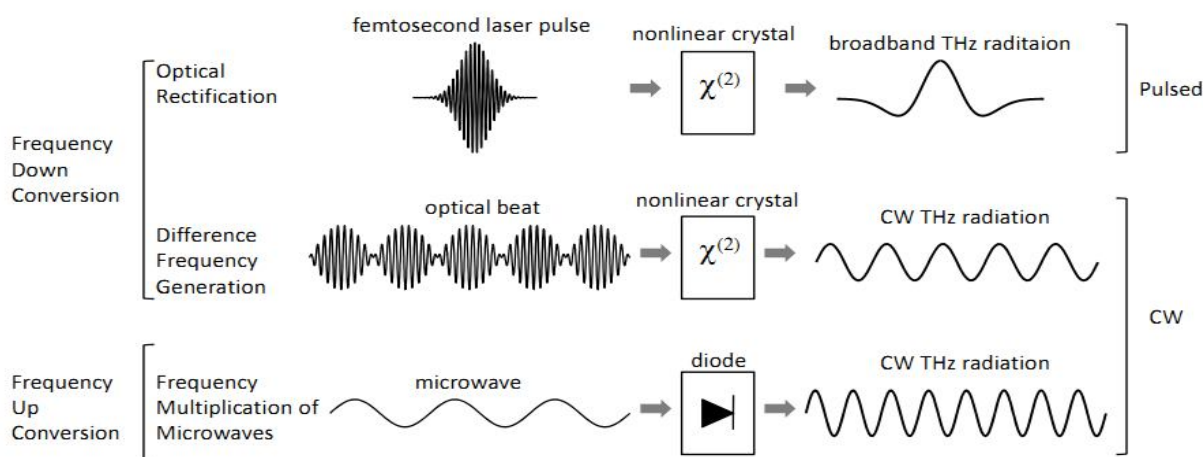
جدول ۱-۱- ویژگی مواد مختلف در محدوده تراهرتز [۲]

Material Type	Optical Property
liquid water	high absorption ($\alpha \approx 250 \text{ cm}^{-1}$ at 1 THz)
metal	high reflectivity (>99.5% at 1 THz)
plastic	low absorption ($\alpha < 0.5 \text{ cm}^{-1}$ at 1 THz) low refractive index ($n \approx 1.5$)
semiconductor	low absorption ($\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$ at 1 THz) high refractive index ($n \sim 3-4$)

ویژگی مواد مختلف در ناحیه‌ی تراهرتز متفاوت از سایر نواحی فرکانسی است و این مسئله اساس تصویربرداری تراهرتز می‌باشد. از آنجایی که بسته بندی محصولات معمولاً دی‌الکتریک هستند، تصویر برداری تراهرتز به‌عنوان یک سنجش غیرمخرب برای بسته بندی‌های مهر و موم شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل جذب بالای آب در این ناحیه، مواد هیدراته از مواد خشک قابل تشخیص‌اند. مواد فلزی نیز به‌واسطه‌ی بازتابش بالا و کاملاً کدر بودن آن‌ها قابل شناسایی‌اند. همین ویژگی‌ها برای کاربردهای امنیتی نیز صادق است. تصویر برداری تراهرتز مناسب برای تشخیص اسلحه، مواد منفجره و مواد مخدر پنهان شده در بسته‌بندی‌های پلمپ شده، می‌باشد.

حساسیت زیاد تشعشع تراهرتز نسبت به آب، برای کاربردهای دارویی نیز مناسب است. در یک سیستم بیولوژیکی، تغییرات کم در مقدار آب می‌تواند نقایص بسیار مهم در حال ظهور در این ناحیه را نشان دهد.

۳-۱- روش‌های تولید موج تراهرتز

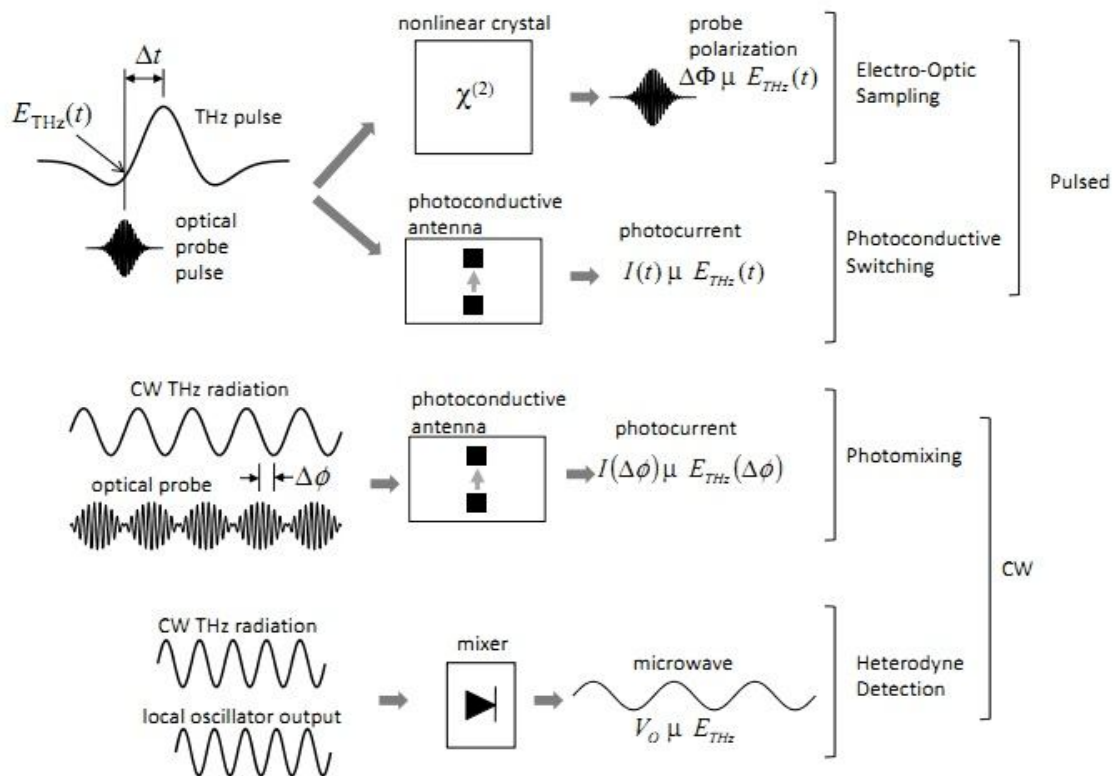


شکل ۴-۱- روش‌های تولید موج تراهرتز در محیط غیر خطی [۲]

شکل ۴-۱ روش‌های مختلف تولید موج تراهرتز را نشان می‌دهد. یکسوسازی نوری و تولید فرکانس تفاضلی (DFG)، فرآیندهای غیرخطی مرتبه‌ی دومی هستند که در آن فوتون تراهرتز با فرکانس ω_T به وسیله دو فوتون نوری در فرکانس‌های ω_1 و ω_2 در کریستال غیرخطی تولید می‌شود؛ به گونه‌ای که $\omega_T = \omega_1 - \omega_2$. لیزر فمتوثانیه که پهنای پالس آن ۱۰ THz می‌باشد، پالس تراهرتز تولید می‌کند. شکل پالس تولید شده همانند شکل پوش پالس نوری تابیده شده می‌باشد. دو پرتوی نور موج پیوسته به وسیله‌ی روش DFG یک تشعشع تراهرتز موج پیوسته تولید می‌کند. حاصل این دو فرآیند غیرخطی به ترتیب تشعشع پالس تراهرتز پهن باند و تشعشع موج پیوسته تراهرتز می‌باشد. در روشی سوم، با استفاده از منبع حالت جامد تراهرتز؛ که مبتنی بر تکنولوژی میکروویو می‌باشد؛ ورودی میکروویو به وسیله دیود غیرخطی به هارمونیک‌های آن تبدیل می‌شود و موج پیوسته تراهرتز تولید می‌شود. به تکنیک تولید موج تراهرتز پیوسته به وسیله‌ی دو پرتوی لیزر با فرکانس‌های متفاوت؛ ضرب کنندگی می‌گویند.

۴-۱- آشکارسازی تراهرتز

تکنیک‌های همسان و غیرهمسان دو دسته بندی کلی فرآیند آشکارسازی موج تراهرتز می‌باشند. تفاوت این دو تکنیک در آن است که در روش همسان دامنه و فاز میدان، هر دو، اندازه‌گیری می‌شوند در حالی که در آشکارسازی غیرهمسان تنها شدت میدان اندازه‌گیری می‌شود. با بکارگیری تکنیک‌هایی می‌توان از یک منبع نورانی به عنوان تولید کننده و همچنین آشکارساز نیز استفاده نمود.



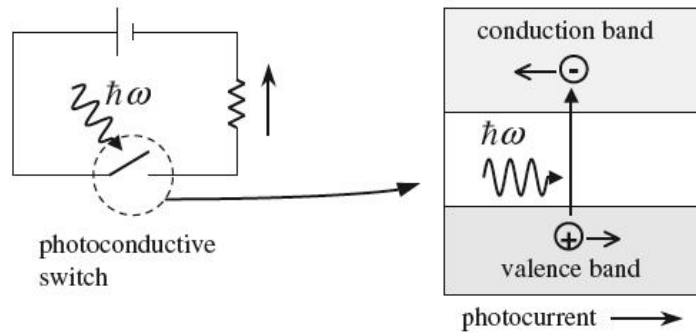
شکل ۵-۱- روش‌های آشکارسازی همسان موج تراهرتز [۲]

شکل ۵-۱ روش‌های آشکارسازی موج همسان را نشان می‌دهد. نمونه‌برداری الکترو-اپتیک فضای آزاد مقدار واقعی میدان حاصل از پالس تراهرتز پهن باند در حوزه‌ی زمان را اندازه‌گیری می‌کند. میدان تراهرتز در کریستال نوری دچار شکست دوگانه می‌شود که مقدار این شکست با دامنه‌ی میدان متناسب است. هم‌چنین میزان شکست به تأخیر زمانی میان موج تولید شده و پالس نوری نیز بستگی دارد. تلفیق تنظیمات مربوط به اندازه‌گیری تولید موج تراهرتز و آشکارسازی آن، اطلاعات لازم جهت تعیین مقدار جذب و هم‌چنین پراکندگی نمونه‌های گرفته‌شده را فراهم می‌کند. به این تکنیک طیف‌نگاری دامنه موج تراهرتز (THz-TDS)^۱ گفته می‌شود.

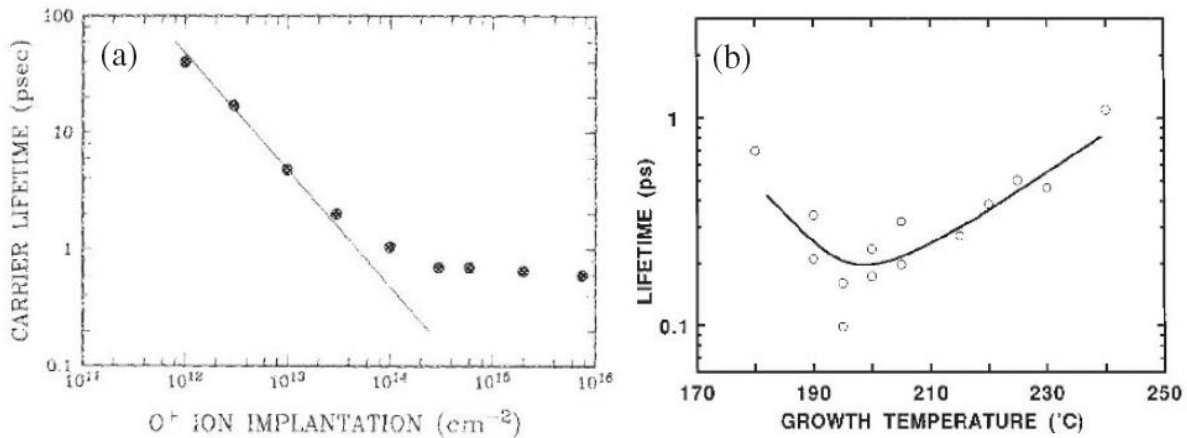
فصل ۲- معرفی آنتن‌های نور-رسانایی

۱-۲- آنتن نور-رسانایی

تحقیقات بر روی آنتن‌های نور رسانا در سال‌های ۱۹۸۰ شروع شد. در این نوع آنتن‌ها پالس‌های لیزر کمتر از پیکو ثانیه، سطح نور-رسانا را روشن می‌کند و این باعث ایجاد جریان‌های پالسی بسیار کمی می‌شود. به بیان دیگر، آنتن‌های نور-رسانایی همانند سوییچ‌های الکتریکی هستند که رسانایی نیمه رسانای آن‌ها با تابش نور به آن‌ها تغییر می‌کند. این عملکرد براساس افزایش تعداد الکترون‌های آزاد حفره‌ها در اثر تابش فوتون‌ها به آن‌ها ایجاد می‌شود. انرژی این فوتون‌ها باید به قدری باشد که بتواند بر انرژی باند آزاد الکترون‌ها غلبه کند و الکترون‌ها را از باندهای دیگر منتقل نماید. در شکل ۱-۲ معادل یک آنتن نور-رسانایی را می‌بینید؛ که همانند سوییچی است که با تابش فوتون به آن، جریانی در مدار جاری می‌شود [۳].



شکل ۱-۲- آنتن نور رسانایی [۳]



شکل ۲-۲- طول عمر حامل‌ها برای RD-sos و LT-GaAs [۳]

اتصال سویچ در آنتن‌های نور-رسانایی تابعی از زمان تابش لیزر به ساختار می‌باشد و قطع سویچ در این ساختارها اغلب تابعی از طول عمر حامل‌های تولید شده توسط نور می‌باشد که به جنس نیمه رسانای زیرلایه بستگی دارد. طول عمر کوتاه حامل‌ها، باعث افزایش سرعت سویچ می‌شود. از پارامترهای مهم دیگر در آنتن‌های نور-رسانا، قدرت جابجایی حامل‌ها و آستانه ولتاژ شکست می‌باشد که هر قدر این دو پارامتر بزرگ‌تر باشند، کیفیت این نوع ساختارها بیشتر می‌باشد.

مواد مختلفی برای آنتن‌های نور-رسانا بررسی شده اند که می‌توان گالیم آرسینید دمای پایین (LT-GaAs)، سیلیکن برروی sapphire با اختلال در تشعشع (RD-sos)، گالیم آرسینید با ناخالصی کرومیم (Cr-GaAs) و فسفید ایندیم (Inp) را نام برد؛ که از میان آن‌ها RD-sos و LT-GaAs در آشکارسازهای تراهرتز و تولید کننده‌های آن، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۲-۲ طول عمر حامل‌ها بر اساس افزایش ناخالصی یون‌ها در RD-sos و افزایش دما در LT-GaAs نشان داده شده- است.

مشکلات زیادی در رابطه با تکنولوژی تراهرتز وجود دارند؛ این‌که چگونه یک آنتن تراهرتزی کارآمد طراحی می‌کنیم بسیار پیچیده است؛ زیرا طراحی آن بسیار متفاوت از طراحی آنتن‌های متداول دیگر است.

به‌واسطه این‌که چگونه سیگنال‌های تراهرتز تولید شوند؛ دو نوع آنتن تراهرتزی وجود دارد: آنتن‌های معمولی و آنتن‌های نور-رسانایی. در ناحیه تراهرتز عمق پوستی رسانا خیلی کوچک است؛ بنابراین تلفات رسانایی می‌تواند بسیار زیاد باشد. به‌نظر می‌رسد که آنتن‌های نور-رسانایی کارایی بهتری دارند. به‌طور معمول آنتن‌های نور-رسانایی بصورت ساختار دو نوار موازی هستند؛ که مشتمل بر یک زیرلایه‌ی نیمه رسانا و یک زوج خط نواری و یک آنتن دوقطبی می‌باشند. بررسی‌های جدید نشان می‌دهد که اگر در لبه دوقطبی برجستگی ایجاد کنند آنتن عملکرد بهتری برای تولید سیگنال خواهد داشت.

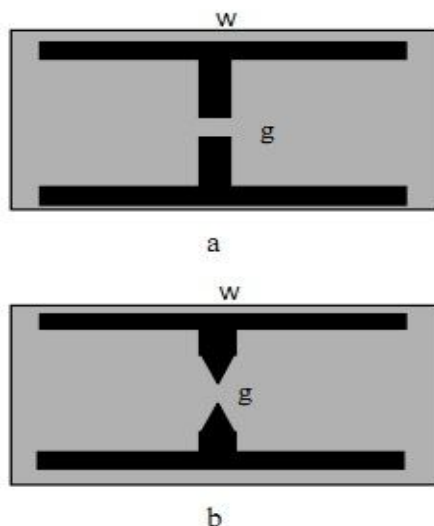
قاعده تولید موج تراهرتز از آنتن‌های نور-رسانایی خیلی متفاوت از انواع متداول آنتن است. ابتدا، پرتو لیزر بر روی نیمه رسانا تابانده می‌شود تا تعدادی جفت الکترون و حفره ایجاد شود سپس بوسیله ولتاژ بایاس که به آنتن روی نیمه رسانا متصل است الکترون‌ها و حفره‌ها سریع شروع به حرکت می‌کنند. بدین ترتیب یک جریان متغیر با زمان تولید شده است و بنابراین یک میدان الکترومغناطیسی تولید می‌شود.

۱-۱-۲- مکانیزم تولید موج تراهرتز در آنتن نور-رسانایی:

تکنیک‌های متعددی به منظور تولید موج تراهرتز ارتقاع یافته‌اند. امروزه یکی از عمده‌ترین روش‌های تولید میدان‌های تراهرتز نور-رسانایی سریع می‌باشد. این روش می‌تواند سیگنال‌های الکتریکی با طول موج کوتاه را در بازه‌ی زمانی چند صدم فمتوثانیه (که در طیف تراهرتز قرار دارند) را تولید کند.

انرژی ناشی از پرتوی لیزر می‌تواند الکترون‌ها و حفره‌های موجود در نیمه‌رسانا را از هم جدا کند. به این جهت‌ها الکترون-حفره می‌گویند. اگر ولتاژ بایاس به نیمه‌رسانا اعمال شود الکترون‌ها و حفره‌ها در جهت خاصی جاری می‌شوند و جریان تولید می‌کنند. بنابراین اگر انرژی ورودی به سرعت تغییر کند تعداد الکترون-حفره‌ها و همچنین چگالی جریان نیز به سرعت تغییر می‌کند. بنابراین میدان الکتریکی متغیر با زمان و در نتیجه موج الکترومغناطیسی تولید می‌شود. جزئیات در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد. نیمه رسانای بایاس شده بوسیله لیزر فمتو ثانیه‌ای با انرژی‌های فوتون بیشتر از باند تهی، تحریک می‌شود؛ متعاقباً الکترون‌ها و حفره‌ها در باند رسانایی و باند ظرفیت، تولید می‌شوند. چگالی حامل‌های نوری با کمک ولتاژ بایاس به سرعت تغییر می‌کند و این موجب تولید میدان الکترومغناطیسی می‌شود که می‌تواند در فضای آزاد به عنوان آنتن تشعشع کند [۲].

۲-۱-۲- ارتباط میان ساختار فیزیکی آنتن و عملکرد آن:



شکل ۲-۳- آنتن نور-رسانایی معمولی و دندان‌دار [۱]

در سال‌های اخیر ساختار آنتن گیرنده مورد توجه ویژه قرار گرفته است از آنجایی که کوچک نمودن ابعاد برای آنتن‌های تراهرتز، به سادگی مسیر نیست روش آنالیز آن‌ها متفاوت است. در محدوده‌ی

مایکروویو، ضخامت زیرلایه (h) کوچکتر از طول موج (λ) می‌باشد، بنابراین از اثر ضخامت زیرلایه می‌توان صرف نظر کرد. ولی در محدوده‌ی تراهرتز h از λ بزرگتر است و در نتیجه بخش بزرگی از توان انتشاری جذب زیرلایه می‌شود بنابراین $\frac{h}{\lambda}$ می‌بایست در محدوده‌ی تراهرتز کوچکتر از محدوده‌ی مایکروویو باشد. به‌عنوان مثال ضخامت زیرلایه برای آنتن شیاردار می‌بایست کوچکتر از 0.4λ و برای آنتن دوقطبی کوچکتر از 0.1λ باشد. این بدان معناست که به زیرلایه‌ای با ضخامت کمتر از 3mm نیازمندیم که دستیابی به آن بسیار مشکل است. بنابراین انتخاب شکل مناسب برای آنتن‌های نور-رسانایی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. اولین نوع آنتن نور-رسانایی متداول است و نوع دوم آنتن‌های نور-رسانایی دنداندار می‌باشد. شکل 2-3 ساختار این دو آنتن را نشان می‌دهد. در آنتن b با توجه به نقطه‌ی مؤثر ساختار، میدان الکتریکی قوی تری نسبت به آنتن دیگر ایجاد می‌شود. علت این پدیده در ادامه توضیح داده خواهد شد:

۱- اغلب الکترون‌ها در لبه دوقطبی توزیع می‌شوند، بنابراین میدان E در آنتن دوقطبی را به صورت میدان الکتریکی حاصل از دو نوار از بارها می‌توان در نظر گرفت.

۲- نقطه مؤثر موجب تمرکز الکترون‌ها روی کناره‌ی تیز دندان می‌شود، بنابراین در آنتن b میدان الکتریکی شبیه به میدان الکتریکی ناشی از دو بار نقطه‌ای ایجاد می‌شود؛ در نتیجه برای مقایسه میدان E حاصل از این دو نوع آنتن می‌بایست مقایسه‌ای میان میدان بار خطی با بار نقطه‌ای داشته باشیم. رابطه 2-1 مربوط به میدان ناشی از بار خطی و رابطه 2-2 بیانگر میدان ناشی از بار نقطه‌ای می‌باشد.

$$E_d = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{\left(\frac{r}{w}\right)^2 + 1}} = \frac{\frac{Q}{w}}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{\left(\frac{r}{w}\right)^2 + 1}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{4r^2 + w^2}} \quad 1-2$$

$$E_i = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad 2-2$$

اگر از زیرلایه و ولتاژ بایاس مشابه استفاده کنیم، در می‌یابیم که E_i بزرگتر از E_d است، زیرا

$$E_d = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{4r^2 + w^2}} < \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{4r^2}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} = E_i \quad 3-2$$

روابط فوق بیانگر آن است که آنتن دنداندار میدان بزرگتری نسبت به آنتن معمولی تولید می‌کند. اکنون به رابطه‌ی میان جریان ماکزیمم و میدان E در آنتن‌های نور-رسانایی می‌پردازیم. اگر یک الکترون در میدان الکتریکی قرار بگیرد داریم:

$$E = \frac{F}{e} = \frac{m_e a}{e} \quad ۴-۲$$

در رابطه‌ی (۴-۲) E میدان الکتریکی، F نیروی الکتریکی و e بار الکتریکی و m_e جرم الکترون و a بیانگر شتاب می‌باشد. با توجه به رابطه مذکور داریم:

$$a = \frac{eE}{m_e} \quad ۵-۲$$

اگر الکترون از آند؛ که نقطه تحریک است؛ به سمت کاتد حرکت کند مسافتی برابر با g را می‌بایست بپیماید (g فاصله خالی در آنتن می‌باشد). این فاصله از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$g = \frac{1}{2} at^2 = \frac{eE}{2m_e} t^2 \Rightarrow \quad ۶-۲$$

$$t = \sqrt{\frac{2gm_e}{eE}}$$

با توجه به تعریف جریان الکتریکی، می‌توان رابطه میان جریان الکتریکی ماکزیمم و میدان الکتریکی را بیان نمود.

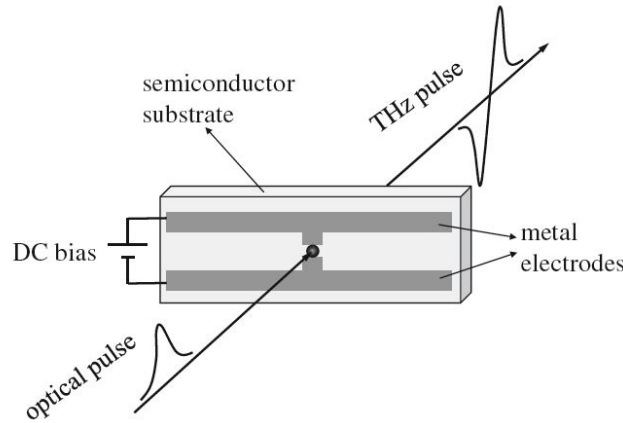
$$I = \frac{Q}{t} = \frac{eN}{t} = \frac{eN}{\sqrt{\frac{2gm_e}{eE}}} = \frac{eN\sqrt{e}}{\sqrt{2gm_e}} \cdot \sqrt{E} \Rightarrow \quad ۷-۲$$

$$\frac{I_i}{I_d} = \sqrt{\frac{E_i}{E_d}} \quad ۸-۲$$

بنابراین میدان الکتریکی بزرگتر منجر به تولید جریان بیشتر و در نتیجه تشعشع موج تراهرتز بیشتر خواهد شد.

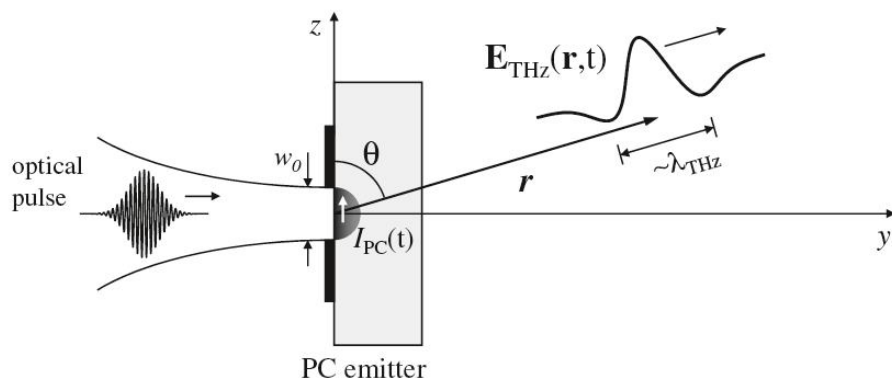
۳-۱-۲- تولید پالس تراهرتز براساس ولتاژ بایاس آنتن نورسانا

پالس‌های کمتر از پیکو ثانیه تراهرتز را می‌توان با تاباندن پالس‌های لیزر درحد فمتوثانیه به آنتن نورسانا، ایجاد کرد. شکل زیر این روند را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴- تولید پالس تراهرتز با آنتن نور رسانا [۴]

همان‌طور که در زیربخش پیشین اشاره شد؛ این آنتن‌ها دارای دو الکترود فلزی هستند که روی زیر لایه نیمه رسانا قرار گرفته اند و یک ولتاژ DC بین این دو الکترود اعمال شده است. پالس لیزر با فوتون-هایی که انرژی آن از سطوح انرژی لایه های مختلف زیر لایه بیشتر می‌باشد، به فضای بین دو الکترود تابیده می‌شود و باعث ایجاد الکترون‌های آزاد و حفره‌ها در این فضا می‌شود. این الکترون‌ها و حفره‌های آزاد شده توسط ولتاژ بایاس شتاب داده می‌شوند و بعد از مدتی (طول عمر حامل‌ها) نیز از بین می‌روند. این روند باعث ایجاد جریان پالسی و در نتیجه تشعشع الکترومغناطیس بصورت پالس‌های کمتر از پیکوثانیه می‌شود. منبع تشعشع آنتن نور رسانا را می‌توان با آنتن دوقطبی هرتز مدل نمود که ابعاد آن خیلی کمتر از طول موج تشعشع یافته از آن است. شکل زیر این مدل را نشان می‌دهد. این مدل هنگامی درست می‌باشد که ابعاد دوقطبی در حدود ابعاد بیم نوری ($\omega_0 \cong 10 \mu\text{m}$) باشد که این اندازه بسیار کوچکتر از طول موج تراهرتز تشعشعی ($\lambda_{THz} \cong 300 \mu\text{m at 1 THz}$) می‌باشد.



شکل ۲-۵- مدل آنتن دوقطبی هرتز برای آنتن نور-رسانا [۴]

حال برای سادگی، تشعشع دوقطبی در فضای آزاد را در نظر می‌گیریم که می‌توان با رابطه زیر بیان

نمود

$$\mathbf{E}_{THz}(t) = \frac{\mu_0 \sin \theta}{4\pi r} \frac{d^2}{dt^2} [p(t_r)] \hat{\theta}$$

۹-۲

به طوری که $\mathbf{p}(t_r)$ ممان الکتریکی دیپل در زمان $t_r = t - \frac{r}{c}$ می باشد. مشتق زمان را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود

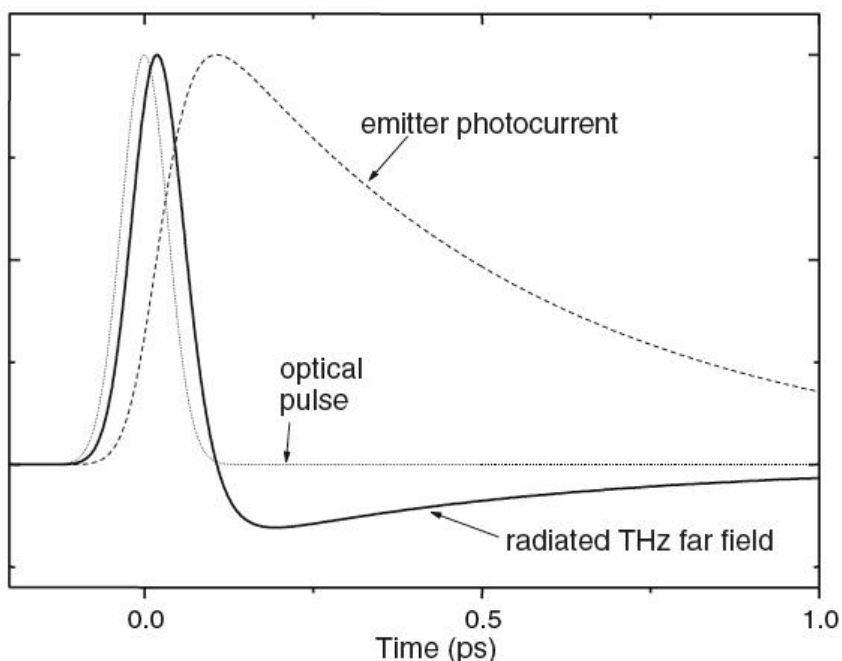
$$\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int \rho(\mathbf{r}', t) \mathbf{r}' d^3\mathbf{r}' = \int \mathbf{r}' \frac{\partial \rho(\mathbf{r}', t)}{\partial t} d^3\mathbf{r}' \quad 10-2$$

بطوری که $\rho(\mathbf{r}, t)$ چگالی حامل های بار می باشد و $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ چگالی جریان نوری می باشد. می توان با استفاده از رابطه پیوستگی بار، روابط بالا را ساده تر نمود و داریم

$$\frac{dp(t)}{dt} = \int J(z', t) d^3\mathbf{r}' = \int_{-w_0/2}^{w_0/2} I_{PC}(z', t) dz' = w_0 I_{PC}(t) \quad 11-2$$

بنابراین با استفاده از رابطه بالا میدان تراهرتز تشعشی به صورت زیر می باشد

$$\mathbf{E}_{THz}(t) = \frac{\mu_0 w_0 \sin \theta}{4\pi r} \frac{d}{dt_r} [I_{PC}(t_r)] \hat{\theta} \propto \frac{dI_{PC}(t)}{dt} \quad 12-2$$



شکل ۲-۶- شکل پالس نوری، جریان آنتن نور رسانا و میدان تشعشی تراهرتز بر حسب زمان

از آن جایی که حرکت الکترون های آزاد از حفره ها بیشتر می باشد، فقط الکترون ها را به عنوان حامل های بار در نظر می گیریم. حال تابع جریان آنتن نوررسانا را برحسب زمان بصورت کانولوشن پالس نوری و توابع ضربه جریان نوری در نظر می گیریم و داریم

$$I_{PC}(t) = \int I_{opt}(t - t') [e n(t') v(t')] dt' \quad ۱۳-۲$$

به طوری که I_{opt} پروفایل شدت پالس نوری و e بار الکترون و $n(t)$ چگالی حامل ها و $v(t)$ سرعت میانگین الکترون ها می

$$\frac{dn_c(t)}{dt} = -\frac{n_c(t)}{\tau_c} + \delta(t), \text{ thus } n_c(t) = \begin{cases} e^{-t/\tau_c} & \text{for } t > 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases}$$

باشد. حامل هایی که با تحریک ضربه ایجاد می

شوند از رابطه زیر بدست می آید

۱۴-۲

که τ_e طول عمر حامل ها و $\delta(t)$ تابع ضربه تحریک نوری می باشد. سرعت میانگین از رابطه زیر بدست می آید

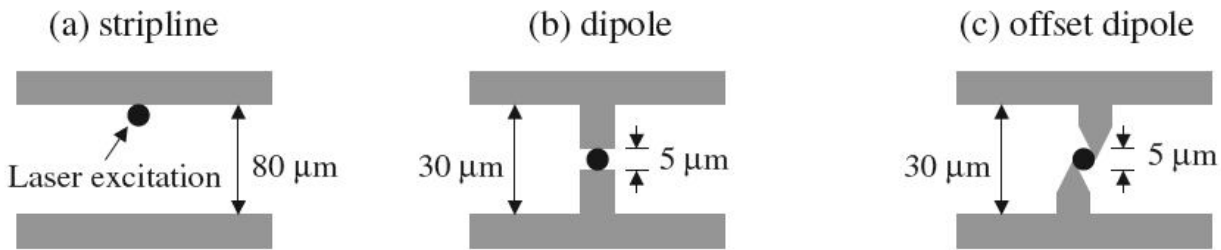
$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{v(t)}{\tau_s} + \frac{e}{m} E_{DC} \quad ۱۵-۲$$

که m حجم توده حامل ها و E_{DC} میدان ناشی از ولتاژ dc می باشد بنابراین برای سرعت میانگین داریم

$$v(t) = \begin{cases} \mu_e E_{DC} [1 - e^{-t/\tau_s}] & \text{for } t > 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad ۱۶-۲$$

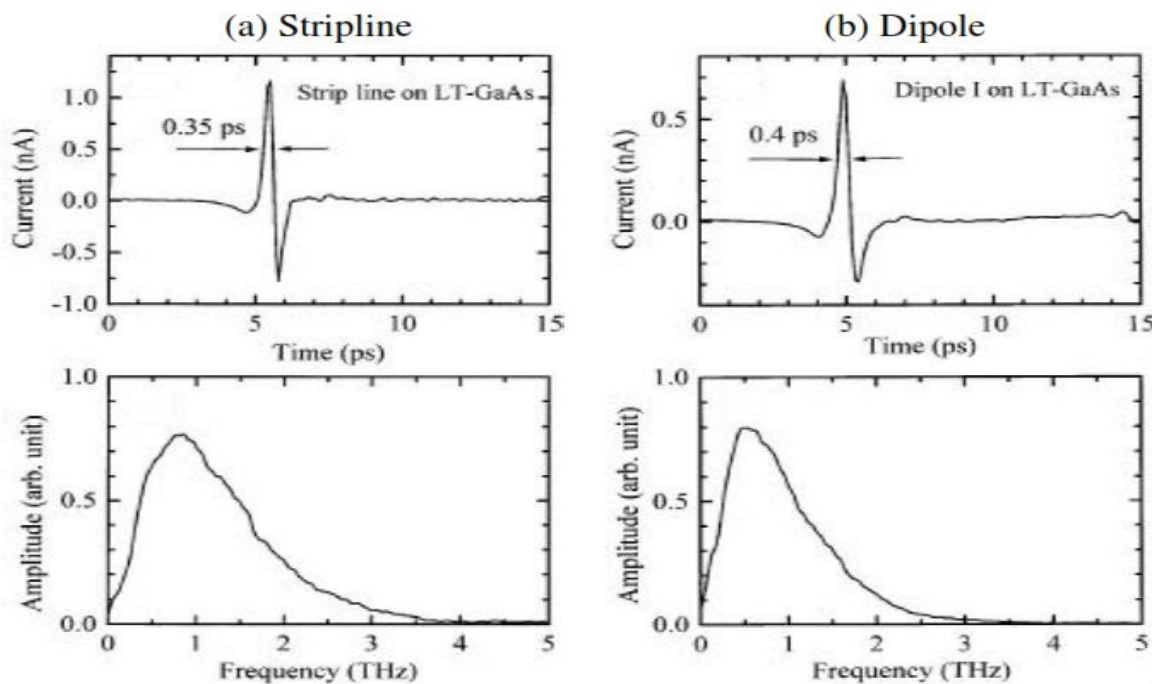
بطوری که تحریک پذیری الکترون ها بصورت $\mu_e = e\tau_s/m$ می باشد. حال فرض می کنیم پالس نوری به صورت تابع گوسین با تکرار $\tau_p = 2\sqrt{\ln 2}$ باشد.

$$I_{PC}(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \mu_e E_{DC} I_{opt}^0 \left[\exp\left(\frac{\tau_p^2}{4\tau_c^2} - \frac{t}{\tau_c}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau_p}{2\tau_c} - \frac{t}{\tau_p}\right) - \exp\left(\frac{\tau_p^2}{4\tau_{cs}^2} - \frac{t}{\tau_{cs}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau_p}{2\tau_{cs}} - \frac{t}{\tau_p}\right) \right] \quad ۱۷-۲$$



شکل ۲-۷- ساختار های متفاوت تغذیه آنتن نور-رسانا [۴]

در شکل ۲-۷ جریان نوری و میدان ناحیه دور تر اهرتز با پارامترهای فیزیکی که از رابطه بالا بدست آمده است، نشان داده شده است. برای محاسبات $\tau_p = 0.048 \text{ ps}$ ، $\tau_s = 0.03 \text{ ps}$ و $\tau_c = 0.5 \text{ ps}$ در نظر گرفته شده است.



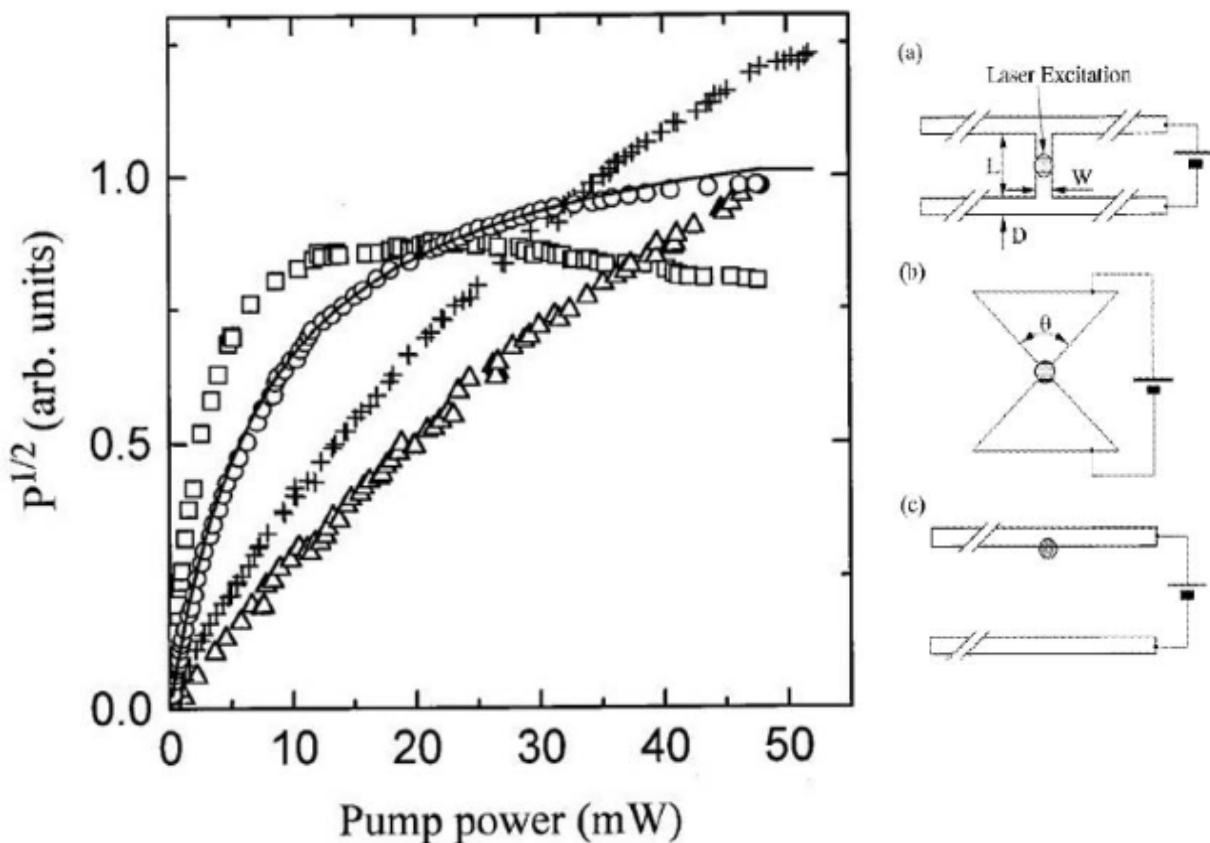
شکل ۲-۸- پالس تراهرتز خروجی آنتن نور رسانا با تغذیه خط استریپ و دیپل [۵]

توان تشعشی تراهرتز و پهنای باند آن به میزان زیادی به ساختار فلزی الکترودها بستگی دارد. در شکل زیر ساختار خط استریپ، دیپل و دیپل با افست نشان داده شده است. فاصله بین دو الکترودها در دوقطبی $5-10 \mu\text{m}$ و در خط استریپ $30-100 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است [۴].

شکل ۲-۸ تشعشع تراهرتز از دو ساختار آنتن نور رسانایی با ابعاد کاملاً مشابه روی زیر لایه LT-GaAs بصورت خط استریپ و دوقطبی را نشان داده است.

پالس خروجی در خط استریپ نسبت به دیپل دارای عرض زمانی کمتری است. همچنین تشعشع ناشی از دیپل دارای پهنای باند کمتر و توان تشعشی بیشتری نسبت به ساختار خط استریپ است. ساختار آنتن می تواند به افزایش بازدهی نیز کمک کند. به عنوان مثال الکترودهایی با سطح مقطع مثلثی

و به صورت افست؛ که در شکل بالا نشان داده شده است؛ دارای بازدهی بیشتری نسبت به ساختار دو-قطبی ساده است. از ساختار مثلثی با افست می‌توان توانی معادل $2-3 \mu W$ با ولتاژ بایاس 60 ولت و توان تحریک نوری $20 \mu W$ و با زیرلایه Ti-sapphire بدست آورد. توان خروجی این ساختارها با افزایش توان نوری تابیده شده و افزایش ولتاژ بایاس افزایش می‌یابد [۵].



شکل ۲-۹- دامنه میدان تشعشی برحسب توان نوری تابیده شده برای ساختارهای مختلف [۵]

ولتاژ شکست زیرلایه، باعث ایجاد محدودیت در توان خروجی آنتن می‌شود. به عنوان مثال ولتاژ شکست برای زیرلایه LT-GaAs حدود 300 kv/cm است؛ که برای یک آنتن با فاصله 5 gap میکرومتر؛ با این زیرلایه؛ بیشترین ولتاژ قابل تحمل، 150 ولت خواهد شد. شکل ۲-۹ دامنه میدان تشعشی برحسب توان نوری تابیده شده را، برای ساختارهای مختلف و با زیر لایه LT-GaAs نشان می‌دهد. در توان‌های نوری کم، توان تشعشی با آن نسبت خطی دارد، اما با افزایش توان نوری تابیده شده، توان تشعشی غیرخطی می‌شود و در مرحله‌ای به اشباع می‌رسد. اشباع در ساختار دیپل نسبت به ساختارهای سریع‌تر رخ می‌دهد و آن به علت فاصله کم gap در محل تغذیه در این نوع ساختار آنتن نور-رسانا می‌باشد.

تفاوت آنتن های نور رسانا با آنتن های معمولی -۴-۱-۲

گرچه آنتن های نور رسانا با طراحی های مختلف ارایه می گردد اما اصول کاری آنها شبیه به هم است و نسبت به آنتن های معمول تفاوت زیادی دارد. تفاوت بین آنتن های نور رسانا در جدول زیر آمده است [۶].

جدول ۱-۲-مقایسه آنتن های تراهرتز معمولی و نور-رسانایی [۶]

Parameters	RF/Microwave Antennas	Photoconductive Antennas
Feed-line/source	Transmission line	Laser beam
Substrate	Dielectric material with thickness \ll wavelength	PC material with thickness comparable with wavelength
Bias voltage	No	Yes
Impedance matching	Easy to achieve	Hard to achieve
Manufacture	Easy to make	Hard to make
Computer aided design	Available	Not available

خط تغذیه: -۴-۱-۲

آنتن های معمولی دارای خطوط تغذیه متفاوتی همچون خطوط مایکرواستریپ هستند. اما آنتن های نور-رسانایی در حقیقت خط تغذیه ندارند و خطوط انتقال با تلفات کم در فرکانس تراهرتز خود از مشکلات پیش روی محققان می باشد. می توان گفت در آنتن های نور-رسانایی خط تغذیه همان لیزر می باشد.

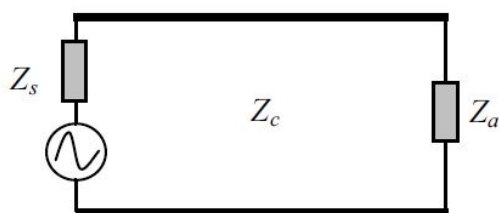
زیرلایه: -۴-۱-۲

زیرلایه برای آنتن های معمولی، عمدتاً مواد دی الکتریک با تلفات کم می باشد، در صورتی که برای آنتن های تراهرتز مواد نور-رسانا که پایه و اساس آن مواد شبه رسانا (نیمه رسانا) مثل Si و InAs و GaAs می باشد، استفاده می شود. میدان شکست الکتریکی بالا، حرکت زیاد الکترون ها از ویژگی های مهم آن محسوب می شود. تفاوت دیگر زیرلایه در آنتن های تراهرتز با آنتن های معمولی این است که ضخامت زیرلایه در آنتن های معمولی نسبت به طول موج بسیار کم است و از تاثیر آن صرف نظر می شود؛ اما در آنتن های تراهرتز نسبت به طول موج این ضخامت زیاد می باشد و این باعث ایجاد مدهای ناخواسته در زیرلایه می شود و علاوه بر آن مقداری از توان میدان در داخل این فضا به دام می افتد.

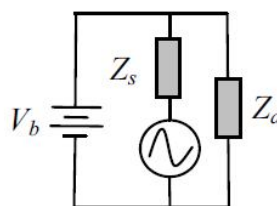
۳-۴-۱-۲- ولتاژ بایاس:

در آنتن‌های معمولی نیازی به وجود ولتاژ بایاس نمی‌باشد ولی در آنتن‌های نور-رسانایی هنگامی که به عنوان فرستنده عمل می‌کنند نیاز است که ولتاژ بایاس اعمال گردد. در زمانی که این آنتن‌ها به عنوان گیرنده عمل می‌کنند نیازی به ولتاژ بایاس ندارند.

۴-۴-۱-۲- تطبیق امپدانس:



(a). Conventional antenna



(b). Photoconductive antenna

شکل ۱۰-۲- تفاوت تغذیه آنتن‌های معمولی با آنتن‌های نور رسانا [۵]

همان‌طور که در شکل ۱۰-۲ نشان داده می‌شود در آنتن‌های تراهرتز برخلاف آنتن‌های معمول خط انتقال وجود ندارد پس مداری برای تنظیم امپدانس وجود ندارد به همین دلیل تطبیق امپدانس بزرگ-ترین موضوع برای آنتن‌های نور-رسانایی می‌باشد.

۵-۴-۱-۲- ساخت:

ساخت آنتن‌های تراهرتز بسیار پیچیده تر و سخت‌تر از آنتن‌های معمول می‌باشد.

۶-۴-۱-۲- طراحی کامپیوتری:

نرم افزار کامپیوتری جامع و کاملی برای طراحی آنتن‌های تراهرتز وجود ندارد و این در حالی است که برای طراحی آنتن‌های معمولی نرم افزارهای جامعی وجود دارد. در آنتن‌های تراهرتز قسمت‌های فلزی را توسط نرم افزارهای شبیه سازی الکترومغناطیس می‌توان شبیه سازی کرد.

۲-۲- بازده آنتن های نور رسانا

آنتن های نور رسانا نسبت به آنتن های معمول تفاوت هایی دارند. یکی از بزرگ ترین تفاوت هایش کم بودن بازده آن ها می باشد، که باعث می شود توان تراهرتز این آنتن ها کم باشد. یکی از مشکلات تکنولوژی تراهرتز مشکل تولید منابع تراهرتز می باشد. دو روش معروف تولید فرکانس های تراهرتز استفاده از ضرب کننده ها و ضرب فرکانس های میلیمتری، و دیگری استفاده از آنتن های (مواد) نور رسانا می باشد. به روش اول روش الکترونیکی و روش دوم روش نوری نیز گفته می شود. با مخلوط کردن دو لیزر با تفاوت فرکانس های در رنج تراهرتز در مواد نور رسانا، می توان فرکانس تراهرتز با موج پیوسته ای ایجاد نمود که به این روش تبدیل فرکانس به پایین^۱ یا هیترودااین^۲ می گویند.

هنگامی که از یک پالس لیزر در حدود فمتوثانیه به آنتن نور رسانا تابیده می شود یک پالس در رنج تراهرتز بین ۰/۲ تا ۳ تراهرتز تولید خواهد شد. عیب بزرگ این ساختارها بهره پایین آن ها است که در حدود ۱٪ برای سیستم های پالسی و کمی بیشتر برای سیستم های پیوسته می باشد. در اینجا با استفاده از روش های تحلیلی به محاسبه بازدهی اینگونه آنتن ها می پردازیم. همانطور که می دانیم بازدهی یک آنتن، شامل بازدهی تشعشی و بازدهی تطبیق امپدانس آن می باشد. بازدهی تشعشی نیز به نسبت توان تشعشی به توان دریافت شده توسط آنتن با رابطه زیر می گویند.

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_{in}} \quad 18-2$$

بازدهی تطبیق امپدانس نیز به نسبت توان دریافت شده توسط آنتن به توان تولیدی توسط منبع P_s گفته می شود.

$$\eta_m = \frac{P_{in}}{P_s} \quad 19-2$$

۱- frequency down conversion

۲- Heterodyne

بنابراین بازدهی کل یک آنتن ضریبی از بازدهی تشعشی و بازدهی تطبیق امپدانس آن می باشد.

$$\eta_t = \eta_m \eta_r = \frac{P_r}{P_s} \quad 20-2$$

حال اگر بازدهی کل یک آنتن را براساس رابطه بالا در مورد یک آنتن نور-رسانایی پیاده‌سازی کنیم می-توان گفت که بازدهی یک آنتن نوررسانایی، نسبت توان تشعشعی آنتن به توان لیزر تابیده شده به محل تغذیه آنتن می باشد؛ که به این بازدهی، بازدهی تبدیل توان نوری به تراهرتز نیز می گویند. طبق بررسی‌های به عمل آمده بازدهی آنتن‌های نور-رسانایی بسیار کم می‌باشد و در حدود 10^{-4} و یا $5 * 10^{-4}$ برای سیستم‌های پالسی می‌باشد و این در حالی است که بازدهی آنتن‌های معمولی بیشتر از ۵۰ درصد می‌باشد. حال سوال اینجاست که چرا بازدهی آنتن‌های نور-رسانایی کم می باشد؟ برای بررسی عوامل تاثیرگذار بر بازدهی آنتن‌های نور-رسانایی، ابتدا به بررسی میزان جریان القا شده روی تغذیه آنتن توسط لیزر می‌پردازیم که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{eV_b \mu_e \tau \eta_L P_L}{hf_L l^2} \quad 21-2$$

که e بار الکترون V_b ولتاژ بایاس اعمالی، μ_e تحرک حامل ها، h ثابت پلانک، L فاصله محل تغذیه (gap)، f_L فرکانس لیزر، P_L توان تابشی لیزر و η_L ضریب روشنایی لیزر می باشد. حال این توان لیزر توسط آنتن نور-رسانایی به توان الکتریکی تبدیل می‌شود که برای محاسبه توان الکتریکی ابتدا مقاومت آنتن را بررسی می‌کنیم که در مقالات مختلفی به صورت زیر بیان شده است.

$$R \approx \frac{hcf_R l^2}{\eta_L e \mu_e P_L \lambda_L} \quad 22-2$$

که c سرعت نور و f_R فرکانس تکرار لیزر می باشد. حال برای محاسبه توان الکتریکی داریم

$$P_E = I^2 R \approx \left(\frac{eV_b \mu_e \tau \eta_L P_L}{hf_L l^2} \right)^2 \frac{hcf_R l^2}{\eta_L e \mu_e P_L \lambda_L} = \frac{eV_b^2 \mu_e \tau^2 \eta_L P_L c f_R}{hf_L^2 l^2 \lambda_L} = \frac{eV_b^2 \mu_e \tau^2 \eta_L P_L f_R}{hf_L l^2} \quad 23-2$$

که در نهایت ضریب تبدیل توان لیزر به توان الکتریکی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\eta_{LE} = \frac{P_E}{P_L} \approx \frac{eV_b^2 \mu_e \tau^2 \eta_L f_R}{hf_L l^2} \quad 24-2$$

همان‌طور که دیده می‌شود ضریب تبدیل توان با ولتاژ بایاس با توان دو، فرکانس تکرار لیزر، نوع روشن کردن محل تغذیه و جنس آنتن نوررسانایی رابطه مستقیم و با فرکانس لیزر و فاصله gap با توان دو نسبت معکوس دارد.

حال باید ضرایب ناشی از تطبیق امپدانس و بازدهی تشعشی آنتن را نیز اعمال کنیم که به صورت زیر می باشد.

$$\eta_m = \frac{P_{in}}{P_s} = 1 - \left(\frac{Z_a - Z_s}{Z_a + Z_s} \right)^2 \quad 25-2$$

برای محاسبه η_m ناشی از تطبیق امپدانس، مقدار امپدانس تغذیه آنتن نوررسانایی (Z_s) را با استفاده از مقادیر بدست آمده برای R محاسبه می کنیم. حال بازدهی کلی آنتن بصورت زیر بدست می آید.

$$\eta_T = \eta_{LE} \cdot \eta_m \cdot \eta_r = \frac{eV_b^2 \mu_e \tau^2 \eta_L f_R}{hf_L l^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{Z_a - R}{Z_a + R} \right)^2 \right] \cdot \eta_r \quad 26-2$$

برای محاسبه بازده تشعشی آنتن نیز می توان میزان جریان I را که در روابط بالا بدست آمد، توسط نرم افزار CST به ساختار آنتن مورد نظر اعمال کرد و بازده تشعشی را بدست آورد. هم چنین میزان امپدانس آنتن (Z_a) را نیز می توان با استفاده از نرم افزار محاسبه نمود.

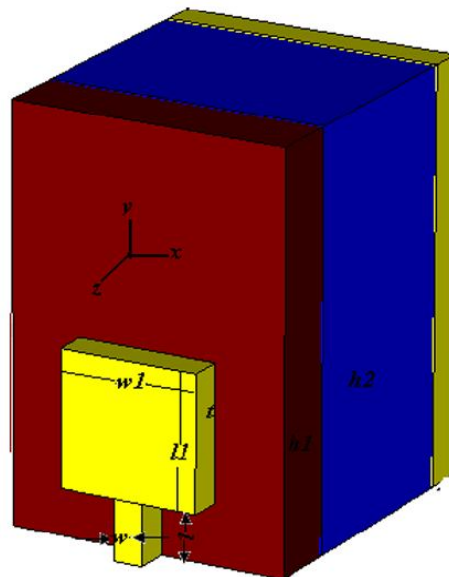
حال برای فهم بهتر مطالب مثالی را مطرح می کنیم. فرض کنید از یک لیزر، پرتویی با فرکانس تکرار $f_R = 80 \text{ MHz}$ و توان $p_l = 36 \text{ mW}$ و طول موج $\lambda_l = 800 \text{ nm}$ (معادل فرکانس ۳۷۵ تراهرتز و انرژی فوتون ۱/۵۵ الکترون ولت) به یک ساختار LT-GaAs با $\mu_e = 1000 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ و $\tau = 0.5 \text{ ps}$ و فاصله $l = 4 \mu\text{m}$ می تابد. در ابتدا با قرار دادن اطلاعات بالا در رابطه مقاومت می توان مقاومت منبع را محاسبه کرد که مقدار ۰/۸۲۷ اهم می شود. حال اگر ولتاژ بایاس ۶۰ ولت فرض شود آنگاه $\mu_{LE} = 1.936 * 10^{-4}$ می گردد که مقدار بسیار کمی است.

اگر آنتن دوقطبی نصف طول موج، با زیر لایه LT-GaAs باشد و امپدانس آن $Z_a = 27$ اهم باشد، آنگاه ضریب تطبیق امپدانس $\eta_m = 0.1153$ خواهد بود و اگر سیستم موج پیوسته (CW) باشد امپدانس منبع بیشتر از ده کیلو اهم خواهد بود و در نتیجه ضریب تطبیق امپدانس کمتر از یک درصد می شود؛ که این نشان می دهد مشکل تطبیق امپدانس در سیستم های CW بیشتر از سیستم های پالسی ظاهر می شود. اگر بازده تشعشی آنتن $\eta_r = 80\%$ فرض شود بازدهی کل آنتن حدود $1.748 * 10^{-5}$ خواهد بود که مقدار بسیار کمی است.

همان طور که دیده می شود، کم بودن ضریب تطبیق امپدانس و ضریب تبدیل توان نوری به توان الکتریکی، باعث شده تا بازدهی آنتن های نور-رسانایی بسیار کم باشد و این موضوع باعث توجه محققان برای افزایش بازدهی این گونه آنتن ها شده است. افزایش بازدهی تشعشی آنتن های نور-رسانایی موضوعی است که تلاش های محققان در زمینه آنتن و علم مواد و فیزیک را به خود اختصاص داده است.

۲-۳- آنتن نور-رسانا میکرواستریپی با دو زیرلایه

وجود آشکارسازها و منابع تولید تراهرتز بصورت دقیق و کوچک از مسایل بحث برانگیز و مهم تکنولوژی تراهرتز می باشد. یکی از کاربرد های تراهرتز در انتقال اطلاعات می باشد؛ که این تکنولوژی قابلیت انتقال اطلاعات زیادی را در واحد زمان دارد. همانطور که می دانیم مهم ترین المان یک سیستم انتقال اطلاعات آنتن می باشد.



شکل ۲-۱۱- ساختار آنتن میکرو استریپ طراحی شده [۶]

به همین دلیل، طراحی یک آنتن تراهرتز بسیار مهم می باشد. در طراحی آنتن های میکرواستریپ در فرکانس های بالا، کریستال های نوری به عنوان زیر لایه مورد استفاده قرار می گیرند. فرکانس بالای این آنتن ها باعث شده تا ابعاد آن ها نیز بسیار کوچک شده اند و این خود مانع بزرگی در راه تحقق این آنتن ها می باشد. محققان استفاده از ساختارهای کریستال نوری را به عنوان زیر لایه پیشنهاد کرده اند که همه این ساختارها دارای گین بسیار پایینی هستند. برای افزایش گین از ساختارهای EBG نیز استفاده شده است. همچنین استفاده از میکرواستریپ های stack نیز به عنوان راهی برای افزایش عملکرد آنتن میکرواستریپ نیز پیشنهاد شده است. اما همه این ها در فرکانس های ماکروویو بررسی شده اند [۶].

در اینجا از یک آنتن میکرواستریپ مربعی با ابعاد $200 \times 200 \mu m$ و ضخامت فلزی $50 \mu m$ روی دو زیرلایه با مشخصات ($ArlonAR600, \epsilon = 6, \tan \delta = 0.0035$) و ($PTFE, \epsilon = 2.08, \tan \delta = 0.0004$) و در فرکانس تراهرتز استفاده شده است. روش های مختلفی برای تحریک این آنتن وجود دارد اما به علت کوچکی ابعاد در فرکانس تراهرتز همه آن روش ها امکان پذیر نمی باشد. در این جا از یک خط انتقال میکرواستریپ برای تحریک آنتن با طول $90 \mu m$ و عرض $40 \mu m$ استفاده شده است. در طراحی آنتن یکی از مهم ترین مراحل طراحی تعیین جنس و نوع زیر لایه می باشد. جنس زیر لایه روی عملکرد آنتن

از نظر بهره و جهت دهی و بازدهی تشعشعی آنتن بسیار تاثیرگذار است. اگر میزان ϵ_r زیر لایه زیاد باشد، آنگاه بهره آنتن زیاد خواهد شد؛ اما در مقابل ابعاد آنتن کاهش می یابد که این مورد در فرکانس-های تراهرتز که ابعاد آنتن بسیار کوچک است امتیاز منفی محسوب می شود. برای اینکه در آنتن های تراهرتز خطای ساخت کمتر شود، نیاز است تا مقدار ϵ_r زیر لایه کاهش یابد اما کاهش ϵ_r زیر لایه باعث کاهش بهره و افزایش پلاریزاسیون متقاطع می شود. برای غلبه بر این مشکل بهترین راه استفاده از دو زیر لایه با ϵ_r ها و ضخامت های مختلف می باشد به طوری که یک زیر لایه دارای ϵ_r بیشتری و زیر لایه دیگری دارای ϵ_r کم می باشد. به همین دلیل در این طراحی از دو زیر لایه استفاده شده است.

یکی از موارد دیگری که باید در فرکانس های تراهرتز در نظر گرفت این است که تلفات محیط برای تشعشعات در این فرکانس بسیار زیاد است. علاوه بر مطلب مذکور؛ تلفات رسانایی دی الکتریک آنتن نیز در این محدوده فرکانسی زیاد می باشد، که باید به دقت بررسی شود. برای بررسی تلفات نیاز است تا ϵ_r موثر را بدست آوریم. برای این منظور از مدل دو خازنی استفاده می کنیم تا بتوانیم ϵ_r موثر را در فرکانس تراهرتز محاسبه کنیم. از آن جایی که ظرفیت خازنی با ϵ_r موثر رابطه مستقیم و با فاصله بین صفحات، رابطه معکوس دارد می توان نوشت.

$$\epsilon_{rc} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \quad 27-2$$

که در آن ϵ_{rc} ضریب نفوذپذیری موثر ساختار ترکیبی است و ϵ_1 و ϵ_2 ضریب نفوذپذیری هر کدام از لایه-های دی الکتریک بالایی و پایینی می باشد. با استفاده از روش نگاشت همدیس داریم.

27-2

$$d_1 = \frac{K(k_1)}{K'(k_1)} \quad \text{where } k_1 = \frac{1}{\cosh\left(\frac{\pi w}{4h_1}\right)}$$

$$d_2 = \frac{K(k)}{K'(k)} - \frac{K(k_1)}{K'(k_1)} \quad \text{where } k = \frac{1}{\cosh\left(\frac{\pi w}{4(h_1+h_2)}\right)}$$

که روابط بالا از رابطه زیر بدست می آیند

$$\frac{K}{K'} = \frac{1}{\pi} \ln\left(2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}}\right) \quad 0.7 \leq k \leq 1 \quad 28-2$$

$$= \left[\frac{1}{\pi} \ln\left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}}\right) \right]^{-1} \quad 0 \leq k \leq 0.7$$

که $K(k)$ انتگرال بیضوی نوع اول می باشد. بعد از اینکه ϵ_{rc} ؛ ضریب نفوذپذیری موثر لایه های

ترکیبی؛ محاسبه شد، باید تابع ϵ_e برحسب فرکانس را محاسبه کنیم زیرا با تغییر فرکانس میزان ϵ_e نیز تغییر خواهد کرد. برای این منظور داریم

$$\epsilon_e(f) = \epsilon_{rc} - \frac{\epsilon_{rc} - \epsilon_e(0)}{1 + (f/f_a)^m} \quad 29-2$$

$$f_a = \frac{f_b}{0.75 + (0.75 - 0.332\epsilon_{rc}^{-1.73})w/h} \quad 30-2 \text{ و } 31-2$$

$$f_b = \frac{47.746}{h\sqrt{\epsilon_{rc} - \epsilon_e(0)}} \tan^{-1} \epsilon_{rc} \sqrt{\frac{\epsilon_e(0) - 1}{\epsilon_{rc} - \epsilon_e(0)}}$$

$$m = m_0 m_c \leq 2.32$$

$$m_0 = 1 + \frac{1}{1 + \sqrt{w/h}} + 0.32(1 + \sqrt{w/h})^{-3}$$

$$m_c = \begin{cases} 1 + \frac{1.4}{1+w/h} (0.15 - 0.235e^{-0.45f/f_a}) & \text{for } w/h \leq 0.7 \\ 1 & \text{for } w/h > 0.7 \end{cases}$$

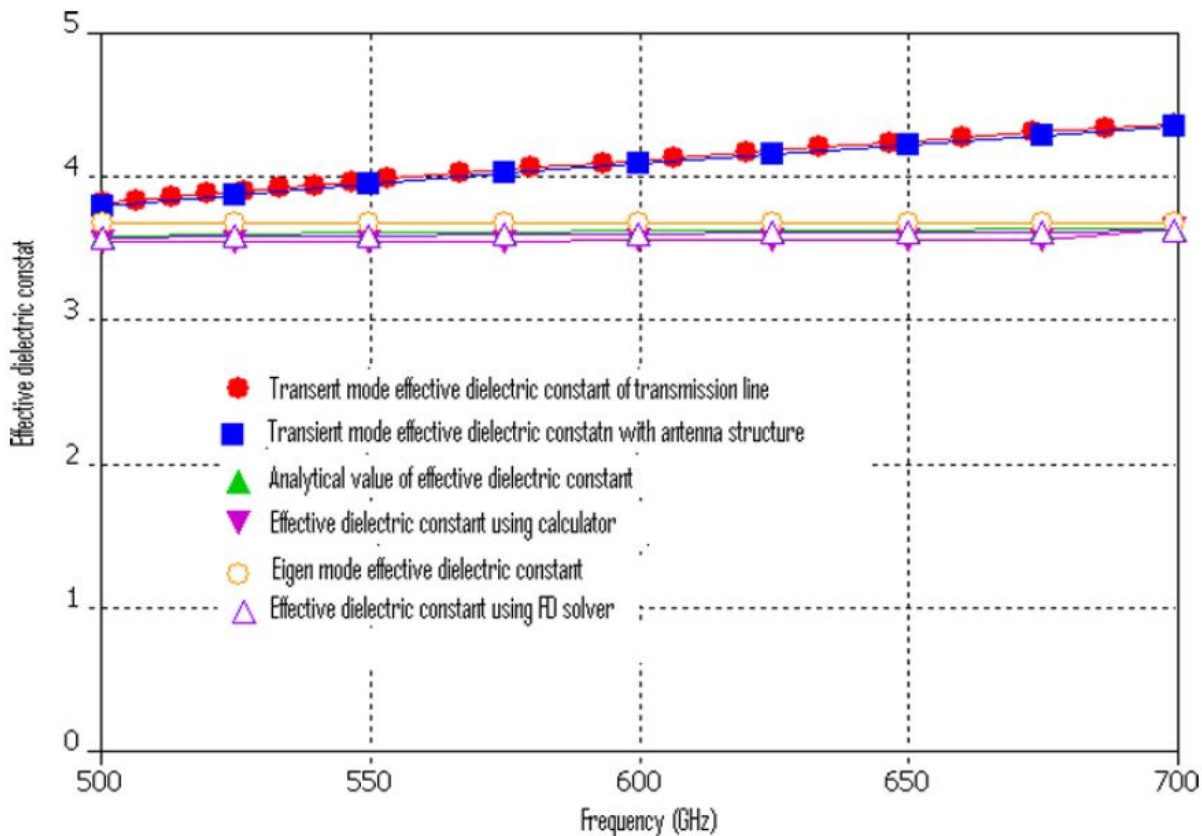
روش های مختلفی برای محاسبه $\epsilon_e(0)$ (ضریب نفوذ موثر استاتیک) در فرکانس های پایین وجود دارد اما در اینجا به علت زیاد بودن فرکانس و برای داشتن دقت کافی از رابطه زیر برای محاسبه $\epsilon_e(0)$ استفاده می کنیم و داریم

$$\epsilon_e(0) = \frac{\epsilon_{rc} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{rc} - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-1/2} + F(\epsilon_{rc}, h) - 0.217(\epsilon_{rc} - 1) \frac{t}{\sqrt{wh}} \quad 32-2$$

33-2

$$F(\epsilon_{rc}, h) = \begin{cases} 0.02(\epsilon_{rc} - 1)(1 - w/h)^2 & \text{for } w/h < 1 \\ 0 & \text{for } w/h \geq 1 \end{cases}$$

که در رابطه 33-2 w عرض خط نواری و t ضخامت فلز آن می باشد.



شکل ۲-۱۲- ضریب دی الکتریک بدست آمده از روش‌های شبیه سازی و تحلیلی [۶]

در شکل ۲-۱۲ نتایج محاسبه ϵ_{rc} (ضریب نفوذ موثر کل ساختار) با استفاده از روش‌های مختلف تحلیلی و شبیه سازی با CST نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینید مقادیر تحلیل و شبیه‌سازی بسیار به هم نزدیک می‌باشند اما در CST Transient solver این منابع با نتایج تحلیل دیگر تفاوت دارد. در شبیه سازی با CST Transient solver، فضای بالای ساختار را فضای آزاد در نظر می‌گیرد که همین فضای آزاد باعث ایجاد اختلافاتی در نتایج می‌گردد که در شکل نشان داده شده است. نتایج تحلیلی به میزان ۰/۴۲۷ درصد با روش frequency domain solver و به میزان ۱/۴۱ درصد با نتایج full-wave و به میزان ۱/۱۴ درصد با نتایج Eigen mode و به میزان ۲/۰۹ درصد با Transient solver تفاوت دارد.

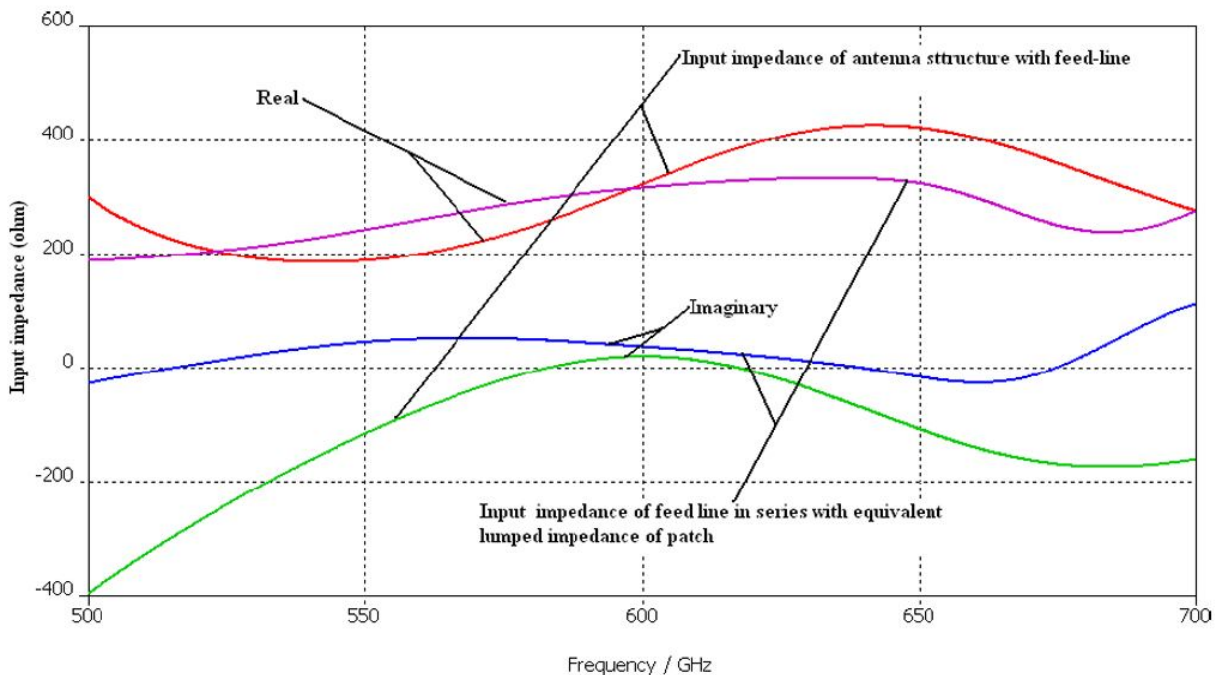
حال باید امپدانس ورودی را محاسبه کنیم. امپدانس ورودی نقش بسیار مهمی در پارامترهای خروجی یک آنتن برعهده دارد. برای این منظور از مدل رسانایی دو شیاره استفاده می‌کنیم. به طوری که ساختار را به صورت دو شیارد در نظر می‌گیریم و رسانایی آن‌ها را از رابطه ۲-۳۴ محاسبه می‌کنیم.

$$G_1 = \frac{1}{90} \left(\frac{w_1}{\lambda_0} \right)^2$$

$$G_{12} = \frac{1}{120\pi^2} \times \int_0^\pi \left[\frac{\sin\left(\frac{k_0 w_1}{2} \cos\theta\right)}{\cos\theta} \right]^2 J_0(k_0 L_1 \sin\theta) \sin^3\theta d\theta$$

$$R_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})}$$

۳۴-۲



شکل ۲-۱۳- امپدانس بدست آمده از طریق شبیه‌سازی کل ساختار و مدار معادل آن [۶]

در رابطه بالا w عرض ساختار تشعشی، λ_0 طول موج فضای آزاد، K عدد موج فضای آزاد، L طول ساختار تشعشی و J بسط نوع اول می باشد. از آن جایی که G_{12} مربوط به کوپلینگ بین دو شیار می باشد و در این مساله فاصله بین دو شیار نسبت به طول موج، بسیار زیاد می باشد (بیشتر از $\frac{\lambda_g}{2}$) می توان از اثر متقابل شیارها صرف نظر کرد و $G_{12} = 0$ در نظر گرفت. بنابراین مقاومت ورودی در فرکانس تشدید $R_{in} = 282$ اهم محاسبه می شود. در شکل ۲-۱۳ تغییرات امپدانس برحسب فرکانس آمده است. حال می توان امپدانس ورودی را برحسب تغذیه نیز محاسبه نمود که از رابطه زیر بدست می آید.

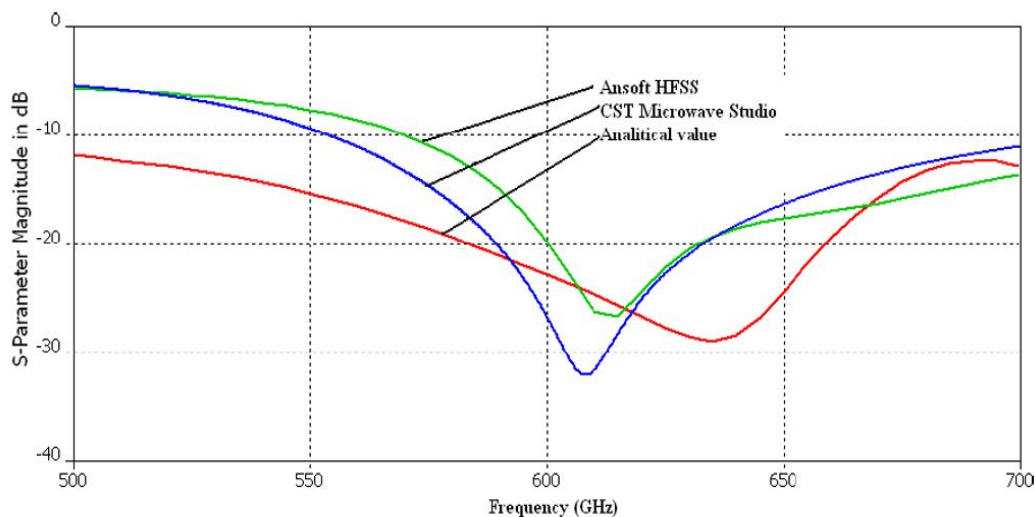
$$R_{in} = R_r \cos^2(\pi x_f / L_1) \quad \text{for } R_r \geq R_{in} \quad ۳۵-۲$$

و میزان راستاوی نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود.

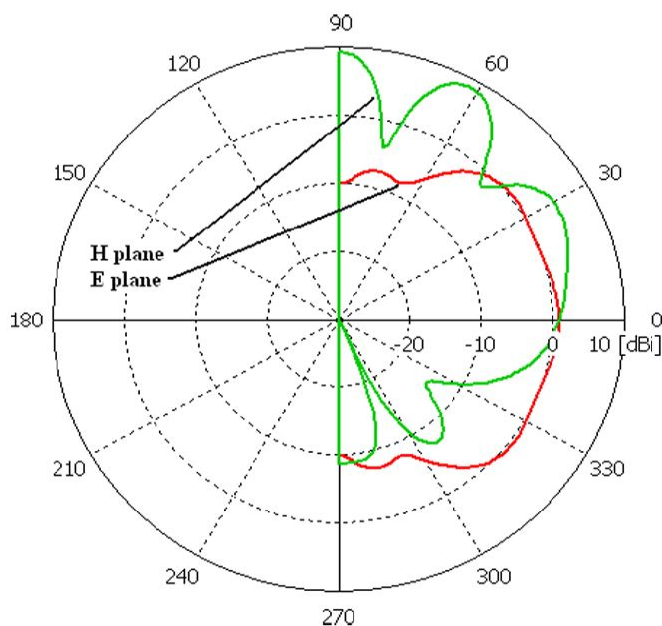
$$G_r = 1/R_r$$

$$D = \frac{2}{15G_r} \left(\frac{w_1}{\lambda_0} \right)$$

۳۶-۲



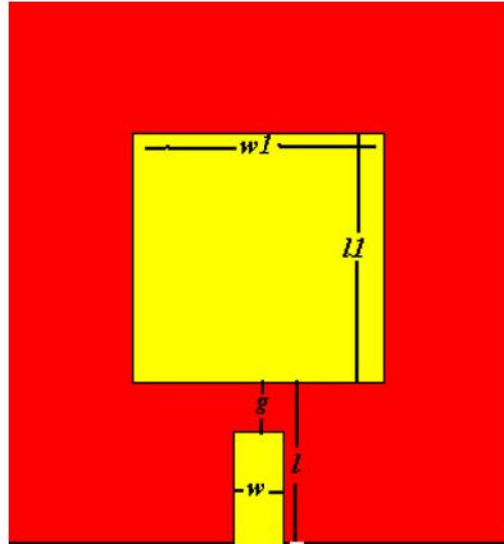
شکل ۲-۱۴- مقایسه تلفات برگشتی آنتن با دو نرم افزار [۶]



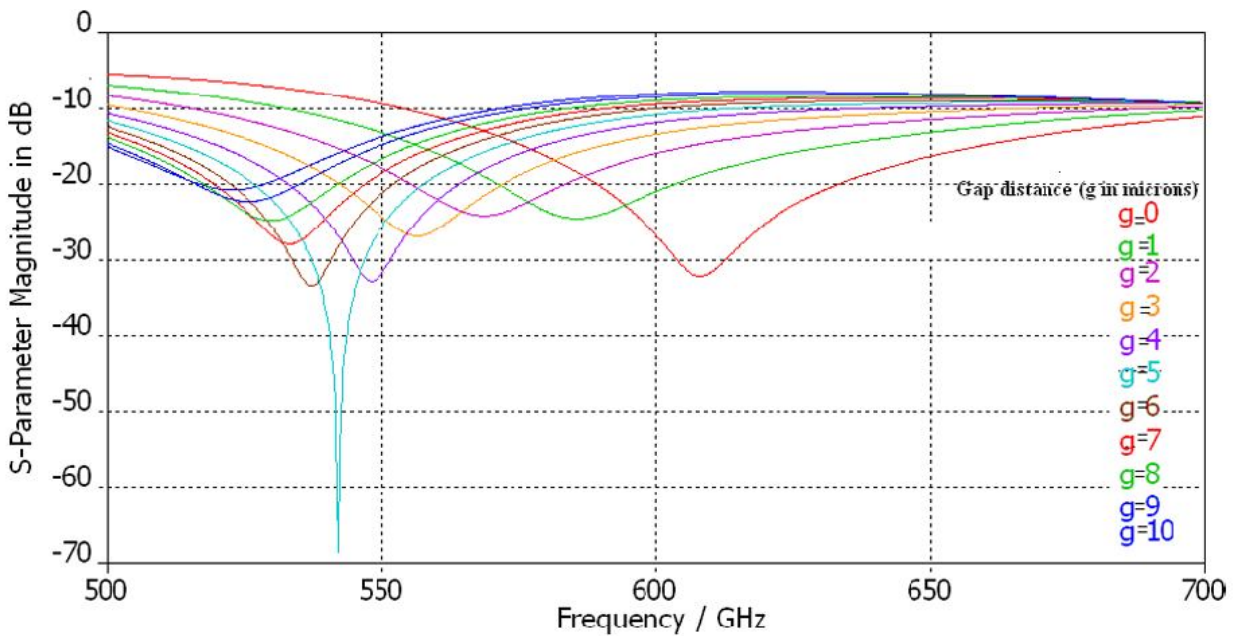
شکل ۲-۱۵- الگوی تشعشعی آنتن طراحی شده [۶]

که در روابط بالا η_f میزان فاصله بین محل تغذیه تا لبه تشعشعی ساختار می باشد. شکل ۲-۱۴ و ۲-۱۵ به ترتیب، میزان تلفات برگشتی این آنتن و الگوی تشعشعی این آنتن در ناحیه دور را نشان می دهد.

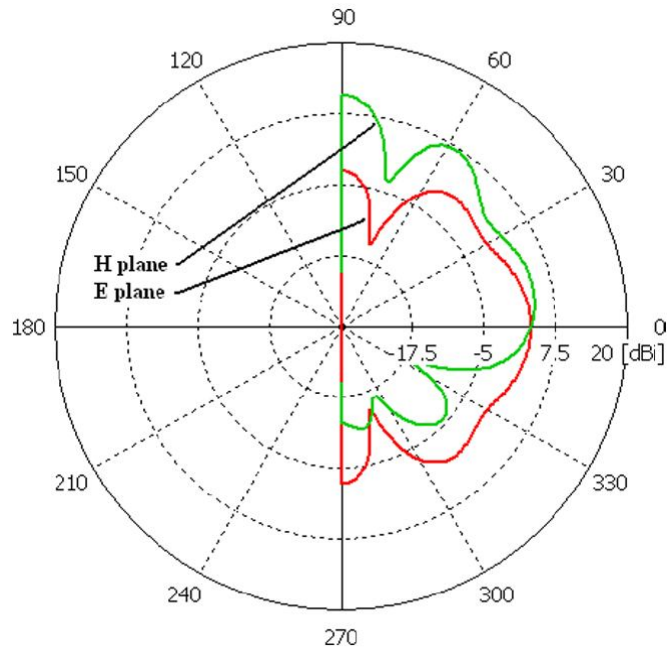
می‌توان آنتن طراحی شده قبل را به صورت یک مدار RLC سری مدل کرد. حال اگر ظرفیت خازنی و یا سلفی به این مدار اضافه شود، می‌توان با آن، فرکانس تشدید ساختار را تغییر داد به طوری که اگر ظرفیت خازنی به ساختار اضافه شود، فرکانس تشدید کاهش و اگر ظرفیت سلفی اضافه شود، فرکانس تشدید افزایش می‌یابد [۵].



شکل ۲-۱۶- آنتن طراحی شده با ظرفیت خازنی اضافه شده [۵]



شکل ۲-۱۷- تلفات برگشتی بر حسب تغییرات ظرفیت خازنی [۵]



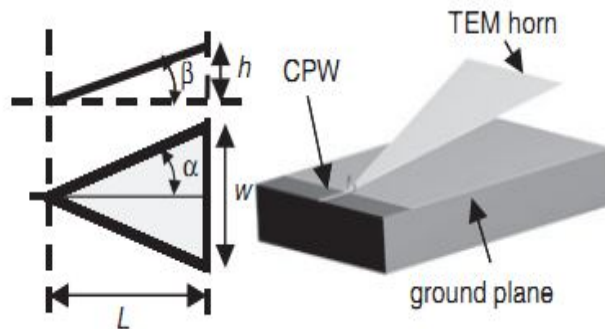
شکل ۲-۱۸- الگوی تشعشی آنتن طراحی شده با ظرفیت خازنی اضافه [۵]

با توجه به شکل زیر جهت دهی آنتن $10/94 \text{ dB}$ می باشد و بهره و بازدهی آن به ترتیب $9/58 \text{ dB}$ و $73/12$ درصد می باشد. در این حالت نسبت به آنتن قبلی جهت دهی به میزان $1/57 \text{ dB}$ و بازدهی به میزان $1/14$ درصد افزایش یافته است.

فصل ۳- آنتن تراهرتز مجتمع

۳-۱- آنتن مجتمع مخروطی تراهرتز

عمده کاربرد آنتن‌های نور-رسانایی مرتبط با طیف نمایی تراهرتز در حوزه زمان بوده است. در این زمینه اصلی‌ترین نیاز شامل تشعشع و دریافت کارآمد پالس‌های پهن باند با اعوجاج کم می‌باشد. مسئله اصلی پاسخ گذرا یا پاسخ ضربه انتقال و یا دریافت می‌باشد. تنها آنتنی که در تجربه‌های پیشین مورد استفاده قرار گرفته بود دوقطبی ترویج شده با آنتن لنز است، علی‌رغم بازده تشعشع پایین ساختار در بیش از بیست سال آنتن‌های پهن باند با بازده مناسب و غیر پراکنده‌ساز با پهنای پالس گسترده‌تر و محدوده فرکانس باریک‌تر (بیش از ۱۰ GHz) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ اما در میان این آنتن‌ها، آنتن هورن الکترومغناطیسی؛ به دلیل سهولت ساخت و بازده مناسب آن؛ یکی از متداول‌ترین آنتن‌های مورد استفاده است.



شکل ۳-۱- آنتن هورن TEM [۷]

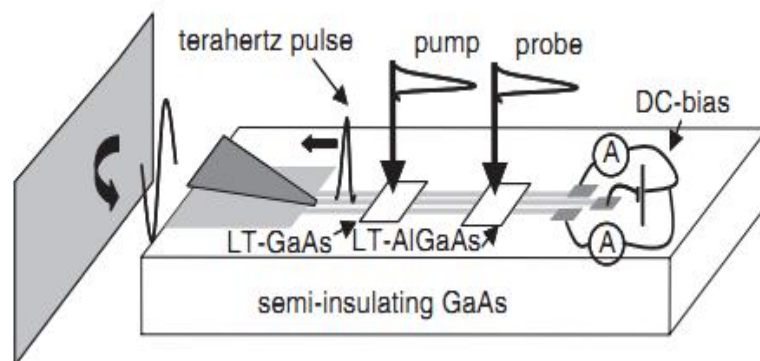
شکل ۳-۱ ساختار آنتن مخروطی الکترومغناطیس عرضی تراهرتز (THz-TEMHA) که بر روی زیر لایه از جنس گالیوم آرسینک ساخته شده‌است را نشان می‌دهد. این آنتن به وسیله مولد پالس زیرپیکو ثانیه‌ای تحریک و با موجبر مسطح ۵۰ اهمی تغذیه شده است [۷].

۳-۱-۱- ساختار آنتن THz-TEMHA

آنتن هورن TEM یک آنتن موج رونده سر آتش است که شامل دو ورق رسانای مثلثی با بازشدگی عرضی 2α و زاویه‌ی بازشدگی طولی 2β می‌باشد. این دو صفحه به شکل خط انتقال مخروطی هستند که امپدانس آن (Z_0) ثابت است و فقط به α و β وابسته است. ما در اینجا به بررسی ساختار تک

قطبی با صفحه زمین متقارن پرداخته‌ایم. در شکل ۱ نمای سه بعدی و ابعاد آنتن قابل مشاهده‌است. این ابعاد به منظور تشعشع کارآمد از ۱۰۰GHZ تا ۱THZ و تطبیق امپدانس ۵۰ اهم انتخاب شده‌اند. ارتفاع آنتن (h) با بهینه سازی ۸۰۰mm انتخاب شده است. این اختلاف را می‌توان بدلیل خمیدگی اندک مثلث دانست. این آنتن با موجبر مسطح^۱ (CPW) ۵۰ اهم با ۱۰mm عرض نوار مرکزی و ۲۲ mm فاصله‌ی زمین تا زمین تغذیه می‌شود. عرض صفحه زمین موجبر تنها ۱۰mm تا عرض کل خط و در نتیجه تلفات تشعشع را کاهش دهد. علاوه بر این، خازن‌های سری بصورت صفحات موازی سیلیکون نیتريد (Si_۳N_۴) به صفحه زمین CPW ها اضافه شده اند تا از ایجاد نیروی الکتروستاتیکی بین آنتن و صفحه زمین جلوگیری شود. یک پلاریزاسیون DC به‌منظور اندازه‌گیری‌های CPW نیاز است. ظرفیت خازن معادل کل در حدود ۱۰۰PF تخمین زده شده‌است و فرکانس قطع آن ۳۰GHZ محاسبه شده- است، که پایین‌تر از محدوده فرکانس کاری آنتن می‌باشد.

مسئله اساسی مجتمع نمودن THZ-TEMHA که ذاتا سه بعدی است با موجبر مسطح می‌باشد. نخست، صفحه زمین بوسیله فتولیتوگرافی استاندارد، تبخیر الکترون- پرتو و تکنیک بلند کردن ناگهانی^۲ بر روی زیرلایه تشکیل می‌شود. پوسته‌ای از طلا به ضخامت ۵mm به شکل مثلث طراحی می‌شود که به‌عنوان لایه محافظ به‌وسیله پاشندگی و آبکاری و لحیم کاری بر زیر لایه حک می‌شود. در آخر، ساختار بوسیله حکاکی لایه‌ی محافظ و خشک شدن آن در خشک کننده فوق بحرانی CO_۲ آماده می‌شود. به بیان دیگر، انحنای ناشی از تنش پس ماند در پوسته طلا با ضخامت آن رابطه عکس دارد، اما از سوی دیگر، با جود خشک کن فوق بحرانی CO_۲، حداقل مقدار انحنای، برای جلوگیری از چسبیدن لازم است. حداکثر خمیدگی؛ که برای مثلث ساخته شده با این فرآیند می‌توان ایجاد کرد؛ حدود ۶۰mm است. پس از آماده سازی، مثلث به‌وسیله میکروکنترلر تا ارتفاع مطلوب بالا برده می‌شود و سپس روی گوهی دی الکتریک یا چسب دو موم پارافین تا نقطه ذوب خود گرما داده می‌شود، که دومی ماده دی الکتریک مناسبی با ضخامت کم و ضریب شکست پایین ($n \approx 1.5$) برای ساختارهای تراهرتز است.

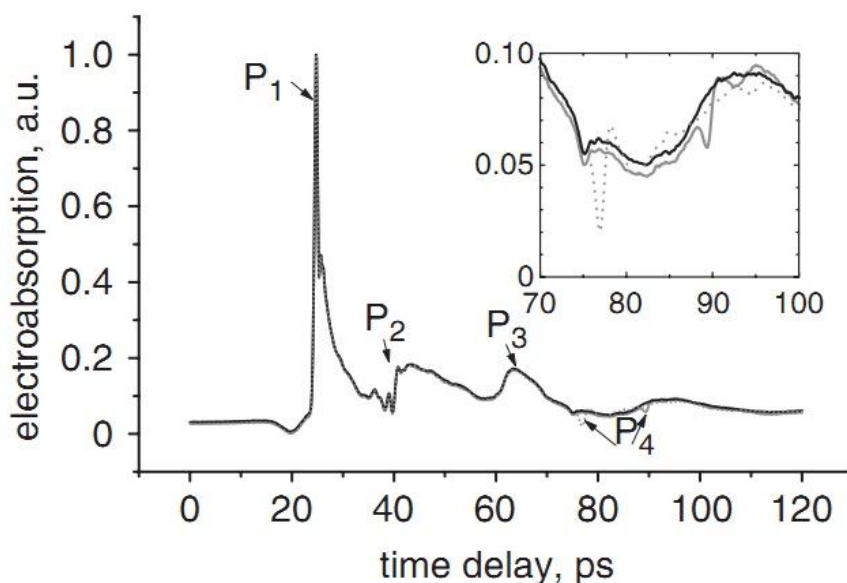


شکل ۳-۲- ساختار آنتن مجتمع [۷]

شکل ۳-۲ ساختار آنتن مجتمع ساخته شده را نشان می‌دهد. منبع نوری یک لیزر با عرض پالس 120 fs در 810 nm و دوره‌ی 76 MHz می‌باشد.

پرتو لیزر به دو پرتو همزمان (بدون اختلاف فاز) تفکیک می‌شود. پرتو پمپ که پالس الکتریکی تولید می‌کند و پرتو پروب که میدان الکتریکی را بوسیله‌ی نمونه‌برداری تشخیص می‌دهد. لازم است شصت ولت بایاس DC به منظور تولید و آشکارسازی به خط نواری مرکزی و صفحه زمین اعمال شود. لازم به ذکر است که THZ-TEMA روی زیر لایه گالیم آرسنیک ساخته می‌شود اما زیر لایه‌های دیگر نیز (مثل سیلیکون، کوارتز و ...) برای فرآیند پیوند مناسب هستند.

این آزمایش که به منظور بهبود بازده و افزایش جهت‌دهی آنتن THz-TEMA برای کاربردهای بسیار پهن باند انجام گرفته‌است به رادار منواستاتیک معروف است که ساخت آن در ابعاد آزمایشگاهی انجام گرفته‌است. اندازه ضریب انعکاس آنتن در محدوده‌ی فرکانسی 0.1 THz تا 1 THz کمتر از 10 dB می‌باشد. این آزمایش برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ صورت گرفت که آنتن تراهرتز پهن باند بطور مستقیم در هوا تشعشع کند و از لنز سیلیکونی به منظور کاهش‌دهنده‌ی اثر تلفات زیرلایه برای اولین بار استفاده نشده‌است.



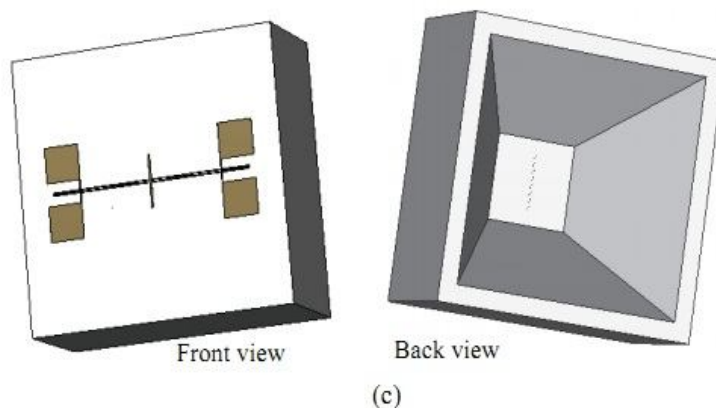
شکل ۳-۳- نتایج نمونه‌گیری متوالی از پروب [۷]

شکل ۳-۳ نتایج حاصل از نمونه‌گیری متوالی بدست آمده از پروب را نشان می‌دهد. P_1 پالس ورودی، P_2 اختلاف پالس انعکاسی از ورودی آنتن و خازن تزویجی، P_3 شکل پالس در انتهای ساختار آنتن و P_4 شکل پالس بر روی صفحه‌ی انعکاس‌دهنده می‌باشد.

با بررسی بیشتر شکل پالس در حوزه‌ی زمان؛ زمان خیزش و ضریب انعکاس ورودی بدست آورده شده است. زمان خیزش در حدود 700 fs می‌باشد. ضریب انعکاس ورودی از نسبت تبدیل فوریه موج بازگشتی به تبدیل فوریه موج تابشی حاصل شده است که مقدار آن روی بازه‌ی مورد نظر (پهنای باند ساختار) کمتر از 10 dB می‌باشد. ساختار این آنتن مجتمع، مناسب برای تحریک امواج سطحی زومرفیلد می‌باشد.

۳-۲- آنتن ضرب‌کننده نوری با محفظه‌ی مخروطی

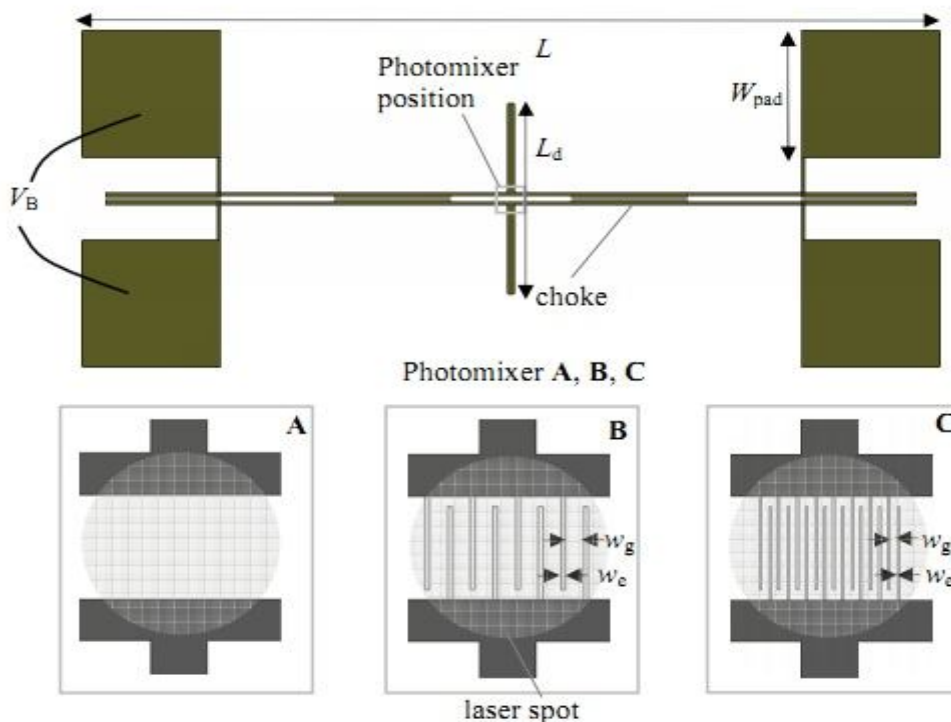
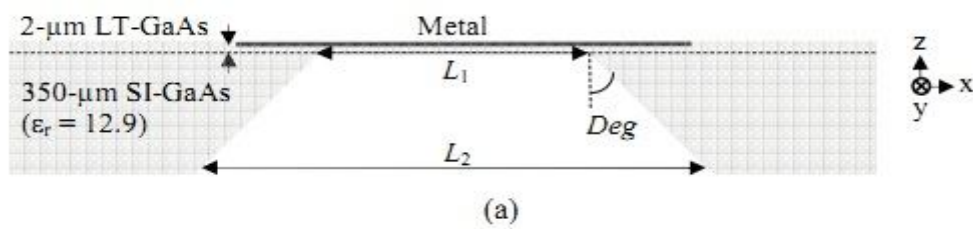
ساختار این آنتن با یک پوسته به شکل محفظه مخروطی؛ که به منظور افزایش تشعشع می‌باشد به کار رفته است؛ پشتیبانی می‌شود. همچنین در این ساختار منبع (ضرب‌کننده‌ی نوری) تطبیق امپدانس قابل قبولی با ساختار آنتن دارد. توان خروجی این آنتن در مقایسه با آنتن‌های موجود؛ که 2 mW در 1 THz خروجی توان دارند؛ به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. با این آنتن پیشنهادی، استفاده از لنز حذف و انتخاب مناسبی برای منابع موج پیوسته‌ی تراهرتز با توان بالا می‌باشد [۸].



شکل ۳-۴- نمای ۳ بعدی آنتن با حفره مخروطی [۸]

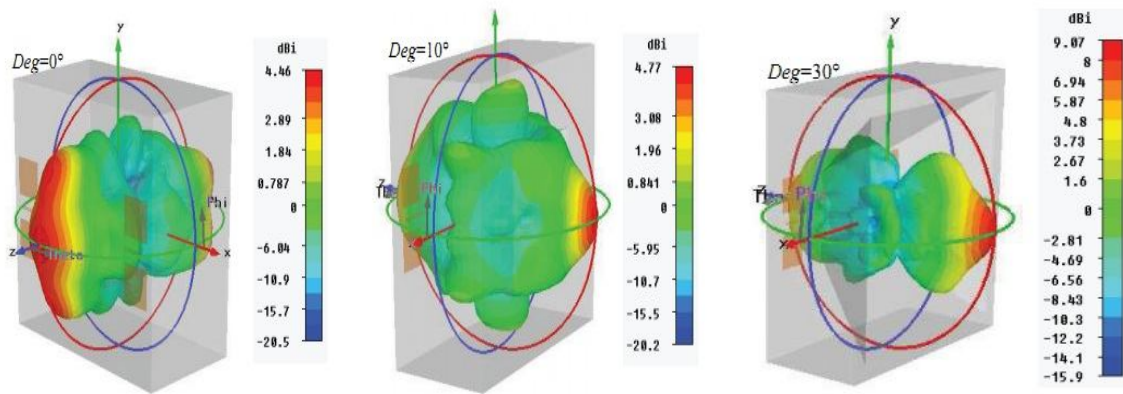
همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، به‌علت کاهش حجم و عملکرد این ساختار در دمای اتاق، این ضرب‌کننده‌ی نوری برای تولید موج پیوسته مناسب است. آنتن مسطح ضرب‌کننده‌ی نوری بر روی لایه‌ای از LT-GaAs؛ که روی زیر لایه ضخیمی از GaAs کشیده شده است؛ ساخته می‌شود. در برخی از ساختارهای آنتن‌های مسطح، استفاده از آنتن دوقطبی در حالت تشدید، می‌تواند موجی با دامنه پیوسته و توان بالاتر نسبت به آنتن‌های حلزونی و پاپیونی تولید کند. زیرا مقاومت تشدید ساختار آنتن دوقطبی بهتر می‌تواند با منبع ضرب‌کننده‌ی نوری تطبیق پیدا کند. اگر چه این ساختار معایبی نیز دارد، که از جمله‌ی آن توان تولید شده در حد میکرو وات (خیلی پایین) می‌باشد. جنس منبع که معمولاً از سیلیکون می‌باشد، موجب ایجاد امواج تلفی در ساختار شده و به‌علاوه، ساختار آنتن که بر روی لایه‌ی ضخیمی از

GaAs قرار گرفته است، موجب می شود که بیشتر تشعشع تراهرتز جذب زیرلایه شود. بنابراین معمولا آنتن لنز سیلیکونی نیز به این ساختار افزوده می شود تا توان تلفاتی را محدود کند. در این ساختار، تکنولوژی غشایی به منظور کاهش ثابت دی الکتریک موثر ساختار به کار گرفته شده است. برای رسیدن به این هدف، ضخامت زیرلایه به $2\mu\text{m}$ کاهش یافته است؛ در این حالت ساختار زیرلایه و آنتن دوقطبی به طول $\frac{\lambda}{2}$ در فرکانس تشدید مقاومت بیشتری ایجاد می نمایند. در واقع این لایه غشایی، محفظه ی مخروطی شکلی است که در زیر ساختار زیرلایه ایجاد شده است تا تلفات زیرلایه را کاهش دهد. شکل ۳-۴ آنتن غشایی را از نمای بالایی و تحتانی نشان می دهد. با یک طراحی مناسب، محفظه ی آنتن می تواند پرتویی با جهت دهی بالا ایجاد کند که نیاز به استفاده از آنتن لنز در ساختار را مرتفع می سازد. در مقایسه با آنتن های مخروطی فلزی؛ که در محدوده ی تراهرتز ساخته می شوند؛ ساخت آنتن مذکور با محفظه مخروطی شکل به سادگی صورت گرفته است. در ادامه روند طراحی آنتن دوقطبی و همچنین محفظه ی مخروطی آورده شده است.

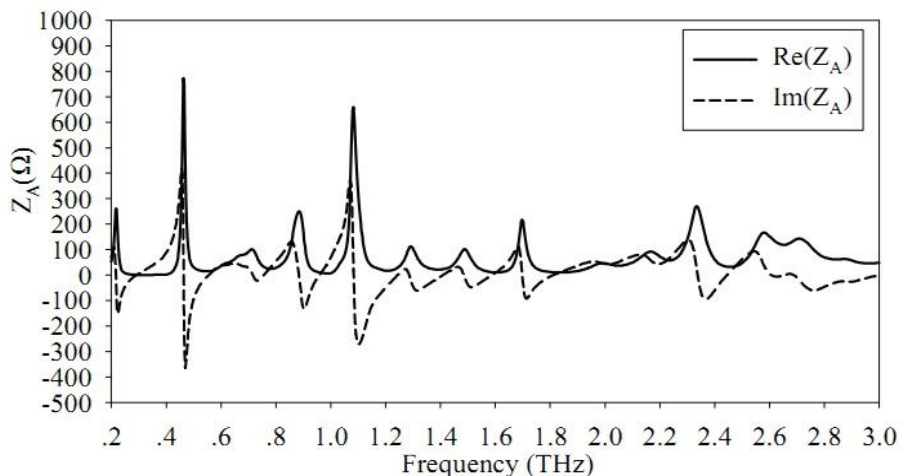


شکل ۳-۵ (a) نمای عرضی از آنتن (b) نمای بالایی از آنتن دوقطبی به همراه چوک (c) ساختار داخلی سه ضرب کننده ی نوری A, B, C [۸]

شکل (a) ۳-۵ برش عرضی از ساختار آنتن که روی غشای قرار گرفته است را نشان می‌دهد. لایه‌ی LT-GaAs به قطر $2\mu\text{m}$ روی 350 mm Si-GaAs شکل گرفته است. سپس غشا بوسیله حفر یک محفظه‌ی مخروطی شکل در زیرلایه‌ی Si-GaAs ضخیم شکل یافته است. شکل (b) ۳-۵ نمای بالایی آنتن را نشان می‌دهد. طول آنتن دوقطبی $L_d = \frac{\lambda_g}{2} \approx 150\mu\text{m}$ می‌باشد. λ_g طول موج در فرکانس یک تراهرتز می‌باشد. ساختار ضرب‌کننده در واقع، فاصله‌ی میان تهی دو الکتروود می‌باشد که الکتروودها به وسیله ولتاژ ثابتی بایاس شده‌اند و از پمپ لیزر به منظور تحریک آنتن استفاده می‌شود. باید به این نکته توجه شود که جریان متناوب جاری شده در مسیر بایاس، تولید تشعشع می‌کند. بنابراین مسیر بایاس به مانند بخشی از آنتن عمل کند و در نتیجه پارامترهای آنتن را تغییر می‌دهد. به منظور به حداقل رساندن این جریان متناوب از چوک استفاده شده است.



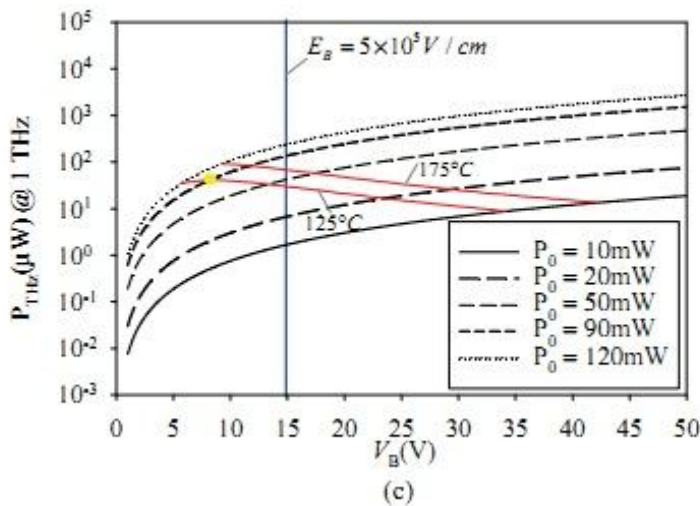
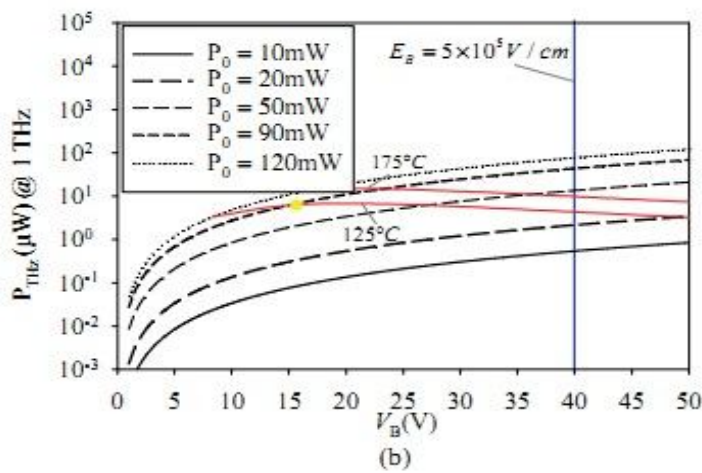
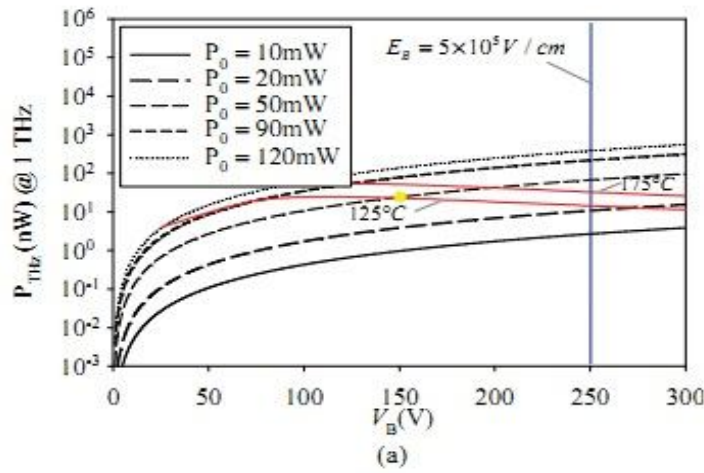
شکل ۳-۶- الگوی تشعشعی آنتن شبیه‌سازی شده [۸]



شکل ۳-۷- نمایش امپدانس آنتن بر حسب فرکانس [۸]

شکل ۳-۶ الگوی تشعشعی ساختار تمام موج فوق را که در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شده است را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، زاویه‌ی بازشدگی محفظه‌ی مخروطی، در میزان جهت-

دهی و هم‌چنین راستای تشعشع پرتوی اصلی، اهمیت دارد. به‌عنوان نمونه، وقتی $\text{Deg}=0^\circ$ تشعشع تنها شامل پرتو اصلی است و پرتوی کناری وجود ندارد ولی مقدار ماکزیمم جهت‌دهی در فرکانس ۱ THz $4,46 \text{ dBi}$ می‌باشد. در حالی‌که با افزایش این زاویه مقدار راستاوی پرتوی اصلی افزایش یافته و در $\text{Deg}=30^\circ$ مقدار راستاوی به $9,07 \text{ dBi}$ می‌رسد؛ هم‌چنین در این زاویه چندین تشدید در طول بازه‌ی فرکانسی یک تا سه تراهرتز می‌تواند رخ دهد. شکل ۳-۷ امپدانس آنتن را در $\text{Deg}=30^\circ$ نشان می‌دهد.

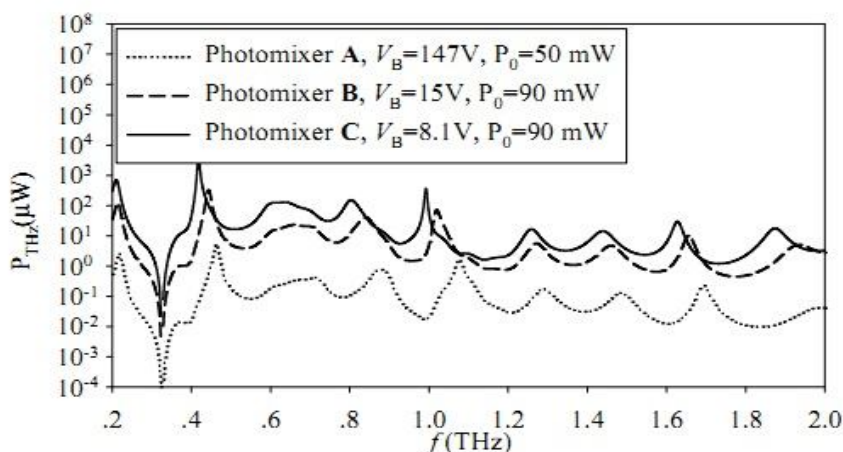


شکل ۳-۹- توان تولیدی توسط سه ضرب‌کننده‌ی مورد آزمایش [۸]

در طراحی ما دمای تخمین زده شده 125°C می‌باشد. این دما در تعیین میزان توان پمپ لیزر (P.) موثر است. توان تراهرتز (P_{THz}) در ولتاژ بایاس مشخص (V_B) با افزایش P.، افزایش می‌یابد. مقدار P.

به گونه‌ای می‌بایست انتخاب گردد که ضرب‌کننده دچار شکست الکتریکی نشود. با توجه به شکل (b) ۳-۳-۵ سه نوع ضرب‌کننده A, B, C در این ساختار آزمایش شده‌اند. توان تولیدی توسط این ضرب‌کننده‌ها در توان‌های ورودی مختلف در شکل ۳-۳-۸ نشان داده شده‌است.

با توجه به نمودارهای ۳-۳-۹، ضرب‌کننده‌ی بهینه شده‌ی C در فرکانس ۱ THz و با ولتاژ بایاس $V_B=8.1$ V می‌تواند توان $P_{THz}=40 \mu W$ را تولید کند و در این شرایط تطبیق امپدانسی مناسبی را بین لیزر و آنتن ایجاد نماید.



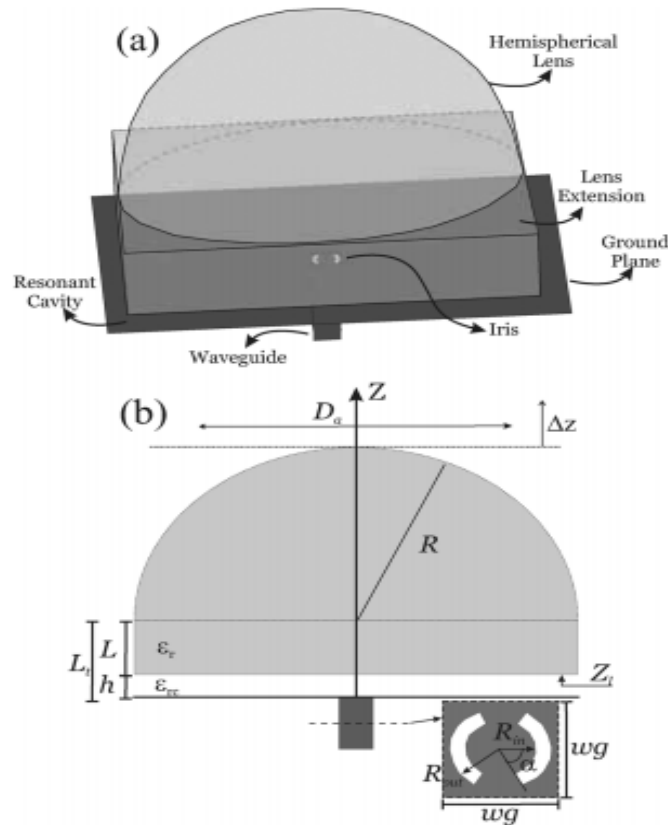
شکل ۳-۳-۱۰- تغییرات ماکزیمم توان خروجی سه ضرب‌کننده A, B, C [A]

شکل ۳-۳-۱۰ تغییرات ماکزیمم توان خروجی مربوط به سه ضرب‌کننده‌ی مذکور را نشان می‌دهد. بنابراین با تغییرات ایجاد شده در ناحیه‌ی زیرلایه (ایجاد حفره مخروطی شکل) ساختاری ایجاد شد که توان خروجی آن نسبت به نمونه‌های پیشین (که حداکثر $2 \mu W$ بود) افزایش چشم‌گیری نموده‌است.

۳-۳-۳- آنتن لنز سیلیکونی تغذیه شده با موجبر موج نشتی

آنتن معرفی شده در این بخش، مناسب برای آرایه‌های مجتمع در فرکانس تراهرتز می‌باشد. این آنتن شامل یک آنتن نیم کروی توسعه یافته با موجبر موج نشتی می‌باشد؛ که می‌تواند با سنسورها و آشکارسازهایی هم‌چون دیود شاتکی به صورت مجتمع درآید. در این آنتن، یک زوج مود موج نشتی TE/TM، در یک محفظه تشدید با صفحه زمین باز و لنز سیلیکونی، تحریک می‌گردد. حصول یک میدان با راستاوی اولیه‌ی خیلی زیاد موجب بهبود بسیاری از فاکتورهای آنتن لنز می‌گردد. ساختار این آنتن سازگار با تکنولوژی‌های جدید نیمه رسانا است و برای تصویر برداری‌های آرایه‌ای در نسبت‌های بزرگ مناسب می‌باشد. پارامترهای اساسی این آنتن؛ مانند ضریب بازتاب^۱، راستاوی^۲، فاز مرکزی^۳ و

انحراف از محور اصلی (اعوجاج محوری) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین الگوهای ثانویه آنتن به روش PO و شبیه‌سازی الگوی تشعشعی راه دور آن در 545GHz موجود است [۹].



شکل ۳-۱۱- آنتن سیلیکونی (a) نمای سه بعدی (b) نمای جانبی [۹]

شکل ۳-۱۱ ساختار این آنتن را نشان می‌دهد که شامل تغذیه‌ی موجبری (که می‌تواند با آشکارساز اسکاتی و ضرب‌کننده بصورت مجتمع درآید) است که به وسیله‌ی موج نشستی و یا محفظه‌ی تشدید با شکاف نواری الکترومغناطیس (EBG) آنتن لنز را تغذیه می‌کند. محفظه تشدید سیلیکونی به منظور تطبیق امپدانس تغذیه‌ی موجبری جهت‌دار با بخش بالایی لنز به کار رفته است. استفاده از این تغذیه، عدد f موثر آنتن لنز را افزایش می‌دهد و در نتیجه‌ی آن بسیاری از پارامترهای مهم نظیر سر ریز از لبه‌ها، اعوجاج محوری و ساخت لایه‌ی پوششی لنز را بهبود می‌بخشد. تغذیه‌ی این ساختار، الگوی تشعشعی

۱. Reflection coefficient

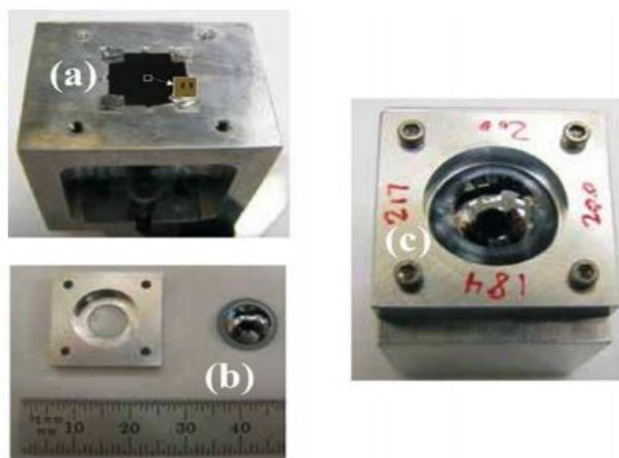
۲. Directivity

۳. Phase center

با راستاوی بسیار بالا در سیلیکون ایجاد می‌کند به گونه‌ای که در 15° مقدار آن تقریباً 10 dB می‌باشد. بخش فوقانی لنز انحنای کمی دارد؛ بنابراین برشی 30° از لنز ارتفاعی در حدود $300\ \mu\text{m}$ دارد که قطر آن 5 mm می‌باشد.

تغذیه این ساختار یک موجبر مربعی است که مد غالب تشعشع یافته از آن TE_{10} می‌باشد. در این موجبر دو تیغه نیز بارگذاری شده است (شکل ۳-۱۱-ب). تیغه‌ها به منظور تطبیق امپدانس آنتن با مود TE_{10} انتشار یافته از موجبر و همچنین جلوگیری از انتشار مود ناخواسته‌ی TM در محفظه تشدید، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مابین تغذیه و لنز دی‌الکتریک، محفظه‌ای به ارتفاع h با ثابت دی‌الکتریک ϵ_{rc} وجود دارد. این محفظه به‌عنوان یک موجبر بخشی-هدایت کننده، موجب پراکندگی مودهای موج نشتی می‌شود. این مودها با ثابت انتشار مختلط k_{lw} پراکنده می‌شوند. موج نشتی در جهت تعریف شده برای انتشار، با مقدار بخش حقیقی ثابت انتشار تشعشع می‌کند و بخش موهومی آن مربوط به تضعیف میدان در روزنه می‌باشد.

در آخر، لنز نیمه کروی با شعاع R روی محفظه تعریف می‌شود. همانطور که در شکل ۳-۱۱-ب مشخص شده است، ساختار لنز بکار رفته در این طراحی علاوه بر قسمت مخروطی ساختاری استوانه‌ای به ارتفاع h دارد. ارتفاع بهینه‌ی h با جابجایی فاز مرکزی تغذیه و همچنین با شعاع بخش کروی لنز تغییر می‌کند، زیرا در فاصله‌ی کمی از تغذیه قرار گرفته‌است و در فاصله‌ی نزدیک تغذیه قرار دارد. آنتن لنز به-کار رفته در این ساختار تغذیه به گونه‌ای طراحی شده است که تنها بخش مرکزی قسمت فوقانی لنز دی‌الکتریک را تحریک می‌کند و بنابراین انحنای کمی در لنز، امکان ساخت با تکنیک فوتو-لیتوگرافی را محیا می‌کند.



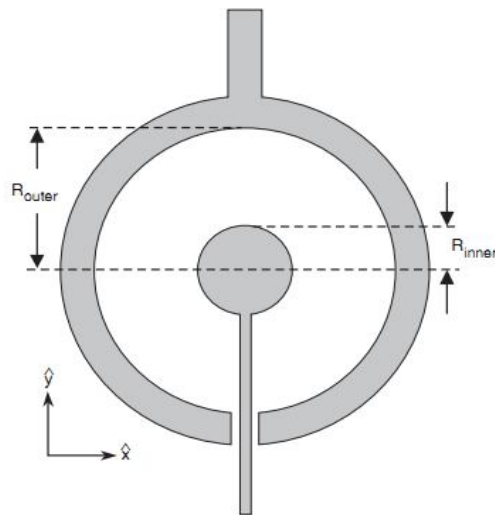
شکل ۳-۱۲ نمونه‌ی ساخته شده آنتن لنز سیلیکونی [۹]

امتیاز ویژه این آنتن‌ها وقتی که در محدوده تراهرتز به کار گرفته می‌شوند مربوط به ساخت آن‌هاست. از آنجایی که تنها به بخشی از لنز (تقریبا 15°) احتیاج داریم، ساخت آن در ابعاد میکرو آسان است. این ویژگی به سازنده این امکان را می‌دهد که یک آرایه از لنزها را بر روی یک قرص نازک سیلیکونی پیاده‌سازی کند.

فصل ۴ - بررسی پلاریزاسیون آنتن‌های تراهرتز

با توجه به پیشرفت‌های علمی که در زمینه تکنولوژی تراهرتز تحقق یافته‌است؛ مشاهده می‌شود که کمتر به مقوله‌ی پلاریزاسیون تشعشع تراهرتز پرداخته شده‌است. با گسترش دانش مرتبط با طیف‌نمایی دامنه‌ی زمانی موج تراهرتز، به نظر می‌رسد که پلاریزاسیون این تشعشع یک جنبه‌ی مهم در سیستم‌های طیف‌نما می‌باشد.

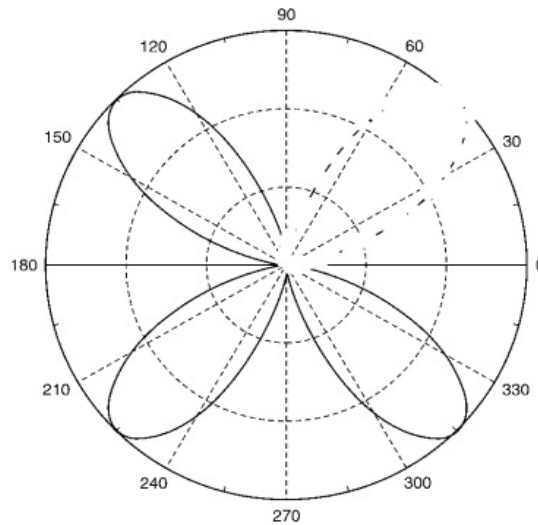
یکی از مشکلات طراحی آنتن‌های تراهرتز تغذیه موجبری این آنتن‌ها می‌باشد. برای آنتن‌هایی با فرکانس کاری پایین‌تر به راحتی از موجبر کواکسیال استفاده می‌شود ولی در محدوده‌ی تراهرتز به علت دشواری‌های مربوط به تطبیق امپدانس ورودی این روش قابل استفاده نمی‌باشد؛ زیرا در این قبیل موجبرها پلاریزاسیون میدان الکتریکی مد TEM شعاعی می‌باشد و این مد شعاعی با موج تولید شده (توسط طیف‌نمایی تراهرتز در حوزه‌ی زمان) در آنتن دوقطبی هم‌پوشانی فضایی ایجاد می‌کند. بنابراین طراحی جدیدی برای آنتن به صورت استوانه‌ای متقارن ارائه شده است، که با منبع تراهرتزی سازگار باشد. الگوی میدان‌های راه دور و پلاریزاسیون شعاعی این آنتن به روش آنالیز تحلیلی و المان‌های محدود محاسبه شده‌است [۱۰].



شکل ۳-۱۳- آنتن دوقطبی با ساختار شعاعی [۱۰]

در روش آنالیز تحلیلی؛ به منظور محاسبه‌ی میدان این آنتن در نبود اثر زیرلایه دی الکتریک؛ میدان تشعشعی را می‌توان با در نظر گرفتن میدان‌های حاصل از تعداد زیادی آنتن دوقطبی که به صورت سری با یکدیگر روی یک دایره قرار گرفته‌اند و هر یک به صورت شعاعی تشعشع می‌کنند محاسبه کرد. در این

روش با محاسبه میدان ناشی از هر دوقطبی و شیفت دادن الگوی تشعشی و چرخش آن می‌توان به الگوی تشعشی این ساختار دست یافت. البته در این روش از اثرات ناشی از زیرلایه صرف نظر شده‌است.

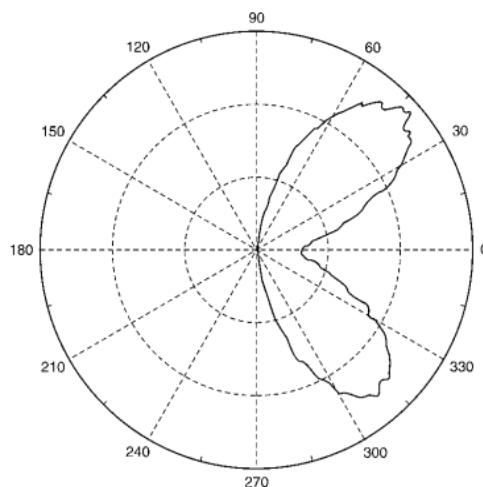


شکل ۳-۱۴- الگوی تشعشی آنتن شعاعی [۱۰]

شکل ۳-۱۴ بیانگر آن است که ساختار مذکور تشعشی در صفحه‌ی آنتن و یا در راستای محور استوانه‌ای آنتن ندارد و با چرخش نتایج حاصل از آن نسبت به محور تقارن آن میدان‌های راه دور ناشی از آن بصورت حلقوی خواهد شد. هم‌چنین توان تشعشی آنتن از جمع آثار دوقطبی‌های مفروض قابل محاسبه است.

$$P \square \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{n} \cdot (\bar{E} \times \bar{H}^*)] = \frac{1}{2} \text{Re}[\bar{n} \cdot (\sum_i^N \bar{E}_i \times \sum_i^N \bar{H}_i^*)] \quad ۱-۳$$

که \bar{E}_i و \bar{H}_i به ترتیب میدان الکتریکی و مغناطیسی ناشی از هر المان دوقطبی می‌باشند.



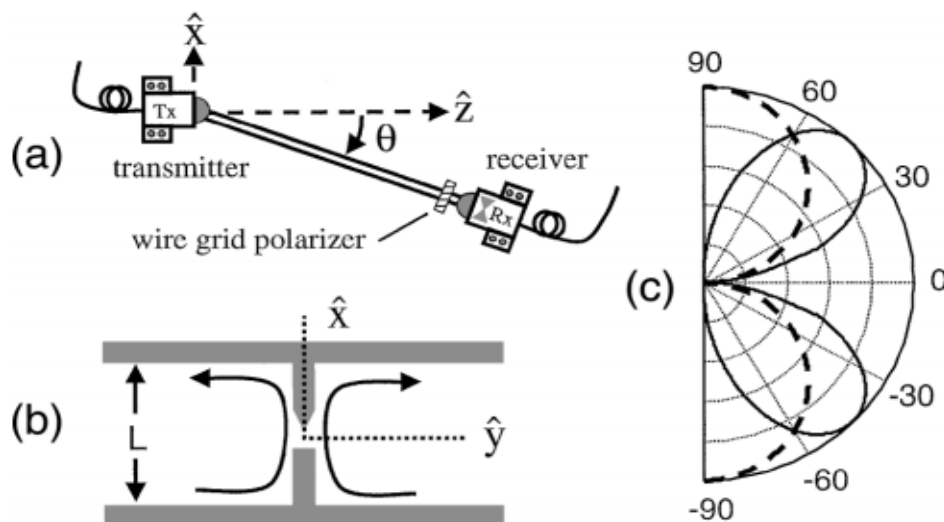
شکل ۳-۱۵- الگوی پلاریزاسیون آنتن شعاعی [۱۰]

در شبیه‌سازی به روش المان‌های محدود، اثرات زیرلایه‌ی ساختار؛ که ضریب دی‌الکتریک بالایی هم دارد؛ لحاظ گردیده‌است. توزیع جریان در صفحه‌ی آنتن (صفحه‌ی Y-Z) به صورت دیسکی به مرکز مبدا تعریف شده‌است، که به دوایری به شعاع R_{outer} و R_{inner} محدود شده‌است. به منظور تخمین الگوی جریان دیسک مورد نظر، جریان متغیر با زمان را از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\vec{J} = \left[\left(\frac{Y}{r} \alpha e^{-\beta r} \right) \hat{y} + \left(\frac{Z}{r} \alpha e^{-\beta r} \right) \hat{z} \right] \epsilon_0 j \omega e^{j\omega t} \quad ۲-۳$$

در رابطه ۲-۳ α و β ثابت‌هایی هستند که بیانگر دامنه‌ی جریان در راستای محور Y و Z می‌باشند. شصت هزار المان به طور نمونه برای محاسبه الگوی میدان شعاعی در نظر گرفته شده‌است. نتایج حاصل از روش المان‌های محدود با روش قبلی همخوانی قابل قبولی دارد. شکل ۳-۱۵ الگوی تشعشی پلاریزاسیون آنتن را نشان می‌دهد. مقدار بسیار زیادی از توان (بیش از ۹۸٪) در زیرلایه‌ی دی‌الکتریک ساختار تلف شده‌است ولی شکل حلقه‌ای انتشار همچنان مشهود است.

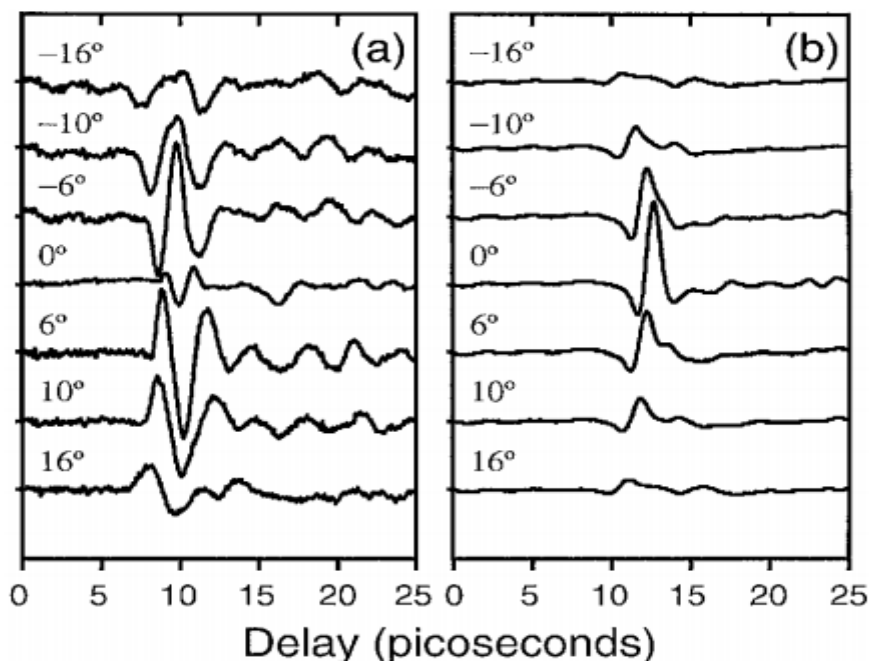
۱-۴- تشعشع چهار قطبی از آنتن تراهرتز دو قطبی



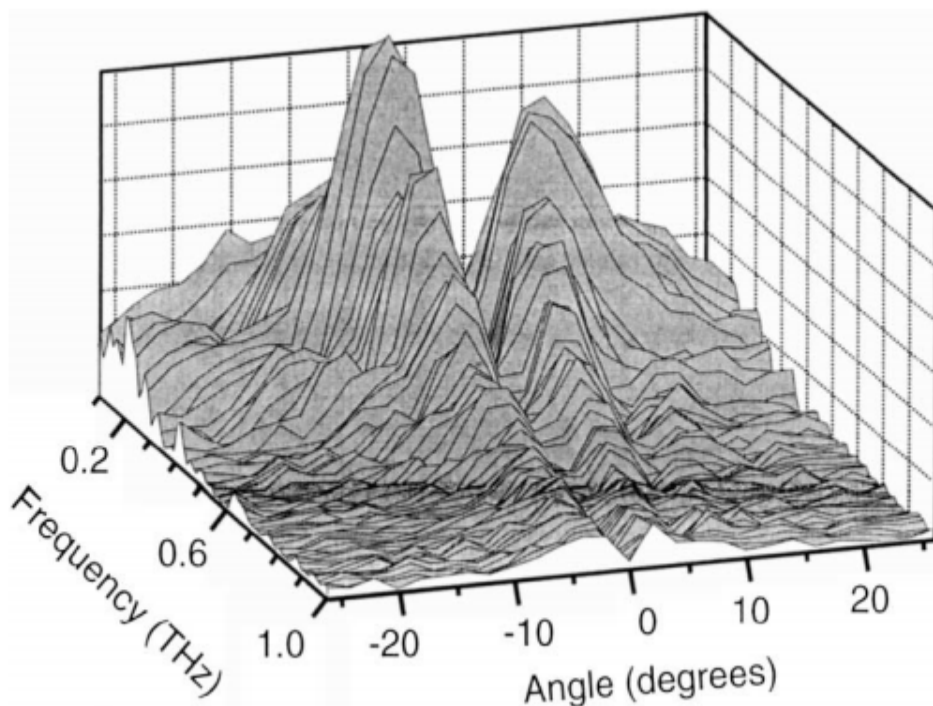
شکل ۳-۱۶- (a) چیدمان آنتن گیرنده و فرستنده (b) آنتن فرستنده [۱۱]

در مطالعات قبلی، تشعشع از آنتن‌های تراهرتز با تخمین آن‌ها با آنتن‌های دو قطبی صورت می‌گرفت. واضح است که دو قطبی‌هایی که در این سیستم‌ها به کار می‌روند، ایده‌آل نیستند. بنابراین پلاریزاسیون آن‌ها خالص خطی نمی‌باشد. در مطالعات انجام شده؛ مقدار تشعشع در پلاریزاسیون متعامد در حدود ۷٪ از پلاریزاسیون مد غالب تشعشع اعلام شده‌است. ولی هیچ آزمایش عملی برای بدست آوردن مقدار آن در

دوقطبی بسیار کوچک در فرکانس کاری تراهرتز تاکنون صورت نگرفته است. در این تحقیق به اندازه‌گیری میدان تشعشع یافته با پلاریزاسیون متعامد از یک لنز کوپل شده با آنتن تراهرتز پرداخته شده است. برای این منظور وابستگی زاویه‌ای پلاریزاسیون‌های افقی و متعامد میدان‌های تشعشع یافته را اندازه‌گیری نموده‌اند. برای این اندازه‌گیری، از یک طیف‌نگار دامنه زمانی تراهرتز که پالس‌های فمتوثانیه‌ای را به وسیله فیبر نوری تک مود به آنتن می‌رساند، استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که حداکثر مقدار میدان با پلاریزاسیون افقی در انحراف 6° نسبت به محور اصلی اتفاق افتاده است. شکل ۳-۱۶ محل قرار گیری آنتن گیرنده و فرستنده را نشان می‌دهد. این چیدمان تضمین می‌کند که حساسیت زاویه‌ای گیرنده نسبت به موج تابشی از بین برود. نتایج شامل توزیع زاویه‌ای تشعشع تابیده شده نسبت به کانولوشن الگوی موج تابیده شده و بازتابیده شده می‌باشد. طول دوقطبی $60 \mu\text{m}$ می‌باشد و از یک آنتن پاپیونی 90° به منظور آشکارسازی استفاده شده است. شبکه سیمی قطبیده مستقیماً در مقابل گیرنده (شکل ۳-۱۶-a) طوری قرار گرفته است که فقط پرتو موازی با گیرنده را دریافت می‌کند. فرستنده و گیرنده هر دو بر روی زیرلایه‌ی GaAs سوار شده‌اند و به لنز کاملاً نیم کره‌ای با شعاع 4mm کوپل شده‌اند. فاصله‌ی گیرنده تا فرستنده 21cm است که در این حالت دقت اندازه‌گیری زاویه‌ای در حدود 2° می‌باشد [۱۱].



شکل ۳-۱۷- شکل موج آنتن فرستنده در زوایای مختلف (a) پلاریزاسیون s عمود بر دو قطبی (b) پلاریزاسیون p موازی با دوقطبی [۱۱]



شکل ۳-۱۸ دامنه موج با پلاریزاسیون عموده نسبت به فرکانس و زاویه قرار گیری گیرنده [۱۱]

شکل ۳-۱۷ نمودارهای موج‌های اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف آنتن گیرنده نسبت به محور اصلی ($\theta=0$) را نشان می‌دهد. آنتن فرستنده افقی است بنابراین میدان E ناشی از آن موازی با سطح افق می‌باشد این تشعشع یک الگوی چهار قطبی ایجاد می‌کند که حداقل دامنه آن در محور نوری رخ می‌دهد و 180° شیفت فاز میان میدان در زوایای مثبت و منفی وجود دارد. برای سهولت، در نظر گرفته شده است که جریان روی سطح آنتن دوقطبی ثابت است. الگوی تشعشعی این آنتن را با در نظر گرفتن جریان القایی موجود در خط نواری، می‌توان توصیف نمود. شکل ۳-۱۸ دامنه موج با پلاریزاسیون عمودی را نشان می‌دهد.

با توجه به اشکال ۳-۱۷ و ۳-۱۸ تشعشع آنتن لنز کوپل شده در فرکانس تراهرتز بصورت چهارقطبی می‌که بر روی محور ساختار کم‌ترین مقدار دامنه را دارا می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که هر تشعشعی که منبع آن نسبت به محور اصلی زیرلایه‌ی لنز بیش از $100\mu\text{m}$ فاصله داشته باشد نمی‌تواند به‌طور موثر در فضای آزاد تشعشع کند. ذکر این نکته ضروری است که این نتایج، حاصل از اولین مطالعات انجام شده (این مطالعه در سال ۲۰۰۰ میلادی انجام شده) بر روی پلاریزاسیون متقاطع آنتن-های دوقطبی کوپل شده با لنز می‌باشد و تاکنون بررسی جدیدی بر روی پلاریزاسیون متقاطع این ساختارها صورت نگرفته است.

فصل ۵- نتیجه گیری

با توجه به مباحث مطرح شده در فصول پیشین می‌توان گفت که طیف فرکانسی تراهرتز با ویژگی‌های منحصر به فرد خود از جایگاه ویژه‌ای در علوم فوتونیک، الکترونیم نوری و مهندسی میکروویو برخوردار است. مطالعه در این زمینه، تنها به فراگیری نظریه‌ها و قواعد مرتبط با این محدوده‌ی فرکانسی منحصر نمی‌شود؛ بلکه علوم گوناگونی به‌طور همزمان می‌بایست مورد بررسی قرار گیرند. مهم‌ترین کاربردهای این محدوده‌ی فرکانسی در حوزه‌ی علوم هوافضا، فیزیک پلاسما، طیف‌نگاری، زیست‌شناسی، تصویربرداری تراهرتز (T-ray) و مخابرات می‌باشد.

امروزه به دلیل نیازهای رو به رشد جوامع برای دستیابی به تکنولوژی‌های جدید، محققان بسیاری در حال مطالعه بر روی ویژگی‌های موج تراهرتز می‌باشند. در جدیدترین مطالعات انجام شده، گروهی از محققان دانشگاه پیتزبورگ در حال بررسی تئوری مربوط به انتقال اطلاعات از طریق تلفن همراه با فرکانس تراهرتز هستند که به صورت بالقوه می‌تواند با سرعتی هزار برابر استانداردهای بیسیم کنونی، به جابجایی اطلاعات بین دو دستگاه بپردازد. به نظر می‌رسد تا پیش از این مطالعه‌ای در خصوص ایجاد پلاریزاسیون دایروی در ساختارهای تراهرتز صورت نگرفته‌است و یکی از چالش‌های پیش روی این پژوهش مقوله‌ی تولید پلاریزاسیون دایروی باشد.

بر اساس مطالب گفته شده در فصول قبل موانع بسیاری نیز بر سر راه استفاده از این محدوده‌ی فرکانسی وجود دارد و همین موانع موجب شده است که با وجود آن‌که سه دهه از مطالعات پیرامون تراهرتز می‌گذرد ولی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای در این راستا صورت نگرفته باشد و همچنان این محدوده به ناحیه gap معروف است. طول موج تراهرتز در محدوده‌ی میلی‌متر و زیرمیلی‌متر می‌باشد و بنابراین آنتن‌های تراهرتزی می‌بایست ابعاد بسیار کوچک‌تری از آنتن‌های معمول داشته باشند. کوچکی این آنتن‌ها، ساخت آن‌ها را دشوارتر می‌کند، زیرا به تکنولوژی بالایی برای ساخت ساختارهای زیرمیلی‌متری احتیاج است. همچنین به منظور کاهش خطای ساخت، می‌بایست از زیرلایه‌ای با ضریب دی‌الکتریک پایین‌تر استفاده نمود ولی کاهش ضریب دی‌الکتریک منجر به کاهش بهره و همچنین افزایش پلاریزاسیون متقاطع تشعشع تراهرتز می‌گردد. به منظور رفع این مشکل از زیرلایه‌هایی با ساختار چندبخشی و یا حداقل دولایه می‌بایست استفاده گردد. تغییر جنس ماده زیرلایه راهکار دیگری است که می‌توان ارائه داد. امروزه از کریستال‌های نوری می‌توان به عنوان زیرلایه ساختار آنتن‌های تراهرتز بهره جست. با توجه به آن‌که ابعاد زیرلایه چندین برابر طول موج تراهرتز می‌باشد، بخش قابل ملاحظه‌ای از

توان تولیدی توسط منبع (بیش از ۹۵٪)، در داخل زیرلایه به دام افتاده و تلف می‌شود. با کمک تکنیک-هایی هم‌چون دنداندار کردن سطح ساختار و یا استفاده از لایه‌ی نازکی از ماده زیرلایه بر روی محفظه نیمه رسانای توخالی، می‌توان از میزان تلفات در زیرلایه کاست.

از مهم‌ترین مشکلاتی که در طراحی این آنتن‌ها مطرح است، پدیده‌ی جذب تشعشعات آنتن توسط مولکول‌های آب موجود در فضای آزاد می‌باشد که موجب کاهش تشعشع آنتن می‌گردد. یکی از راه‌های کنترل میزان رطوبت پیرامون ساختار، کوپل نمودن آنتن تشعشعی با لنز می‌باشد. البته استفاده از آنتن لنز مزایای بسیاری از جمله افزایش بازده ساختار، جهت‌دهی و بهره‌ی آنتن را نیز فراهم می‌کند؛ ولی با این روش می‌توان میزان رطوبت و حتی دمای اطراف ساختار را نیز کنترل نمود.

با توجه به عدم استفاده از خطوط انتقال در اغلب آنتن‌های تراهرتزی (به‌ویژه آنتن‌های نور-رسانایی)، تطبیق امپدانس آنتن با منبع بسیار دشوار است و همین عدم تطبیق‌پذیری موجب کاهش بازده تشعشعی آنتن می‌گردد. لازم به ذکر است که امپدانس منبع نوری (مانند لیزر) در حدود چند ده کیلو اهم بوده و امپدانس آنتن نور-رسانایی (مانند دوقطبی استاندارد) در حدود ۳۰ اهم می‌باشد. به‌منظور سهولت تطبیق منبع با آنتن، محققان به‌دنبال راهی برای افزایش امپدانس آنتن می‌باشند. یکی از راهکارهای ارائه شده استفاده از آنتن دوقطبی خمیده شده می‌باشد [۱۲، ۱۳].

علاوه بر موارد مذکور، روش‌های تحریک آنتن‌های تراهرتز نیز با آنتن‌های معمولی متفاوت است. تاکنون بیشتر مطالعات بر روی آنتن‌های تراهرتز نور-رسانایی صورت گرفته است که در آن‌ها از منبع نوری (لیزر) به‌منظور تحریک آنتن استفاده می‌شود. ولی در مطالعات جدید، به‌دنبال راهی برای تحریک آنتن تراهرتز هم‌چون سایر آنتن‌ها هستیم. تحریک آنتن از طریق موجبر موج نشتی یکی از راهکارهای ارائه شده در این بخش می‌باشد.

فصل ۶- پیشنهادات

در فصل ۴ به چالش‌های موجود بر سر راه طراحی آنتن‌های تراهرتز پرداخته شد. به نظر می‌رسد یکی از اصلی‌ترین موانع موجود بر سر راه طراحی آنتن تراهرتز، بازده پایین این ساختارها می‌باشد. یکی از روش‌های افزایش بازده ساختار، افزایش بهره می‌باشد. تکنیک‌های متعددی برای بهینه‌سازی مقدار بهره وجود دارد که یکی از آنها استفاده از آرایه‌ای از آنتن‌ها به منظور افزایش جهت‌دهی و بهره می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده بر روی ساختار ارائه شده در بخش ۳-۳ [۹]، می‌توان امیدوار بود که با استفاده از آرایه‌ای از آنتن تشعشعی مذکور، به ساختاری با بهره‌ی مطلوب دست یابیم. مزیت استفاده از این روش، جای دادن آرایه‌ای از آنتن‌های تشعشعی در زیر یک ساختار لنز می‌باشد که موجب کاهش ابعاد نهایی آنتن می‌گردد. همان‌گونه که در بخش ۳-۳ گفته شد، در ساختار قبلی تنها از بخش کوچکی (حدود ۱۵ درجه) از آنتن لنز نیمه‌کروی برای دستیابی به بهره استفاده شده بود که با کمک آرایه نمودن ساختار می‌توانیم از کل ساختار لنز به‌طور یکنواخت برای رسیدن به میزان بهره و جهت‌دهی مطلوب استفاده نماییم. با توجه به پیچیدگی ساختار مورد نظر، برای دستیابی به الگوهای تشعشعی آنتن می‌بایست از روش‌های عددی به‌منظور تحلیل ساختار پیشنهادی استفاده گردد.

[١] Di LI , Yi HUNAG, “ Comparison of terahertz antennas”, The University of Liverpool, L٦٩ ٣GJ, UK, ٢٠٠٦.

[٢] Yun-Shik Lee, “Principles of Terahertz Science and Technology” , Springer, LLC, ٢٣٣ Spring Street, New York, NY ١٠٠١٣, USA, ٢٠٠٩.

[٣] Kumud Ranjan. Jha. G.Singh. “Analysis and Design of Rectangular Microstrip Antenna on two-layer Substrate Materials at Terahertz Frequency”. J. comput. Electron (٢٠١٠)٩:٦٨-٧٨.

[٤] Yi Huang, Neda Khiabani, Yaochun Shen and Di LI. “Terahertz Photoconductive Antenna Efficiency”. Antenna Technology (iWAT), International Workshop. ٢٠١١.

[٥] Y. Cai, I. Brener, J. Lopata, J. Wynn, L. Pfeiffer. “ Design and performance of singular electric field terahertz photoconducting antenna”. Appl. Phys. Lett., Vol. ٧١, No. ١٥, ١٣ October ١٩٩٧.

[٦] Neda Khiabani, Yi Huang, and Yao-chun Shen . “Discussions on the Main Parameters of THz Photoconductive Antennas as Emitters”. Proceedings of the δ th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP).

[٧] E. Peytavit, J-F. Lampin, T. Akalin and L. Desplanque, “Integrated terahertz TEM horn antenna”, electronic letters , ١٨th January ٢٠٠٧.

[٨] M. Sun , Z. N. Chen , J. H. Teng, and H. Tanoto, “A Membrane Supported Photomixer Driven Antenna with Increased Continuous-Wave Terahertz Output Power”,IEEE MWP, ٢٠١١.

[٩] B. Liombart, G. Chattopadhyay, A. Skalare, I. Mehdi, “Novel Terahertz Antenna Based on a Silicon Lens Fed by a Leaky Wave Enhanced Waveguide”, IEEE Trans. Antennas and propag. VOL. ٥٩, NO. ٦, JUNE ٢٠١١.

[10] J.A. Deibel, M.D. Escarra and D.M. Mittleman, Photoconductive terahertz antenna with radial symmetry, electronic letters, 3rd March 2005.

[11] J. L. Johnson and D. M. Mittleman, "Quadrupole radiation from terahertz dipole antennas", Optic Lett, Vol. 28, No. 20, October 18, 2003.

[12] K. Moon, H. Han, I. Park. "Folded dipole antenna for increased cw THz output power", Department of Electrical and Computer Engineering, Pohang University of Science and Technology, San 31 Hoja-dong, Nam-gu, Pohang, 790-783, Korea, 2008.

[13] C. Ryu, I. Kim, H. Kwak, Y. Kang, "A folded dipole antenna having extremely high input impedance for continuous-wave terahertz power enhancement", Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Wonchon-dong, Youngtong-gu, Suwon, 443-749, Korea, 2009.