

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

حسبنا الله ونعم الوكيل نعم المولى ونعم النصير



دانشگاه تبریز

دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین

گروه مهندسی نانوالکترونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی نانوفناوری-نانوالکترونیک

عنوان

آشکارسازی امواج تراهرتز با استفاده از لیزرهای مخابراتی

استاد راهنما

دکتر محبوبه دولتیاری

استاد مشاور

دکتر قاسم رستمی

پژوهشگر

ویدا قهرمانی

شهریور ۱۳۹۲

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به:

پدر و مادر عزیزم؛ آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است. هرچه آموخته‌ام در کتب عشق‌شما آموختم و هرچه بگوختم

قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیان را سپاس توانم گفت. امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما. بوسه بر

دستان پرمهرتان.

و به برادران عزیزم؛ این همفران مهربان زندگی‌ام، که باهم آغاز کردیم، دکنا هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم. قلمم

لبریز از عشق به شماست و خوشبختی‌تان منتهای آرزوی من است.

سپاس خدای را که سخوران در ستودن او بماند، شازندگان شردن نعمت های او ندانند و کوشندگان حق او گذاردن نتوانند؛ سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وام دار وجودشان است و نفرین پیوسته بردشمنان ایشان تا روز رستاخیز.

بدون شک جایگاه معلم برتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دستان ناتوان، چیزی بکارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس گذاری از انسانی است که روح و جان افراد پرورش داده و بر سوی رشد، ترقی و تعالی می برد، بر حسب وظیفه و از باب "من لم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل":

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و دشمنی من قلم عشو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی ام یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده اند؛ از دانشمند شایسته، جناب آقای پروفور دکتر علی رستی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی تمام، از بیچ گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند؛ از سرکار خانم دکتر محبوبه دولتپوری، جناب آقای دکتر قاسم رستی و جناب آقای پروفور دکتر علی رستی که به ترتیب زحمت راهبانی، مشاوره و داوری این پیمان نامه را منتقل شدند؛ از اساتید بزرگوار گروه نانو اکترونیک، آقایان دکتر سعید گل محمدی، دکتر حامد باغبان، دکتر کریم عباسیان و دکتر غلام رضا کیانی که در این دوره افتخار آموختن علم و ادب در حضور ایشان را داشتم؛ و از کلیه اساتید و آموزگارانم که در مقاطع مختلف تحصیلی ام، زمینه سازی نمودن راه علم و معرفت برای اینجانب بوده اند، صمیمانه قدر دانی و سپاس گذاری می نمایم.

ویدا قربانی

شهر پور ماه ۱۳۹۲

نام خانوادگی: قهرمانی	نام: ویدا
عنوان پایان نامه: آشکارسازی امواج تراهرتز با استفاده از لیزرهای مخابراتی	
استاد راهنما: دکتر محبوبه دولتیاری	
استاد مشاور: دکتر قاسم رستمی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی نانو فناوری گرایش: نانوالکترونیک دانشگاه: تبریز دانشکده: مهندسی فناوری های نوین تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۱۳۹۲ تعداد صفحه: ۹۱	
کلید واژه: تراهرتز، آشکارساز، اثر پاکلز، نمونه برداری الکترواپتیک، لیزرهای فمتوثانیه	
<p style="text-align: right;">چکیده</p> <p>آشکارسازهای امواج تراهرتز دارای نقش کلیدی در طیف وسیعی از زمینه های کاربردی هستند. بنابراین اهمیت توسعه فناوری های الکترواپتیکی جهت آشکارسازی گسیل های تراهرتز، غیرقابل چشم پوشی می باشد. در سال های اخیر، تولید و آشکارسازی پالس های تراهرتز به دلیل کاربرد گسترده آن ها در طیف سنجی و مطالعه پدیده های فوق سریع، مورد توجه دانشمندان بسیاری قرار گرفته است. جهت آشکارسازی دامنه زمانی پالس های تراهرتز اغلب از آشکارسازهای الکترواپتیک استفاده می شود. آشکارسازی الکترواپتیک پالس های تراهرتز، مبتنی بر اندازه گیری مدولاسیون فاز القاء شده در پالس نوری در حال انتشار در کریستال الکترواپتیک می باشد. این مدولاسیون فاز به دلیل ایجاد اثر غیرخطی مرتبه دوم توسط پالس تراهرتز در کریستال، اتفاق می افتد. در این پایان نامه به بررسی و شبیه سازی آشکارساز الکترواپتیک پالس های تراهرتز با استفاده از لیزرهای فمتوثانیه، پرداخته شده است. بدین منظور، نمونه برداری الکترواپتیک پالس های تراهرتز، با استفاده از تکنیک الیپسومتری، در حوزه فرکانسی به طور کامل تشریح گردیده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که طیف پالس تراهرتز ورودی به کریستال الکترواپتیک به طور قابل توجهی تحت تأثیر یک تابع فیلتر قرار می گیرد. در گام بعدی، با شناسایی و مدل سازی خصوصیات الکترواپتیک در چهار کریستال GaP, ZnTe, InP و GaAs، به شبیه سازی انتشار پالس تراهرتز در داخل ماده الکترواپتیک پرداخته ایم. علاوه بر آن، با شبیه سازی سیگنال الکترواپتیک اندازه گیری شده، اثر عدم تطبیق فاز و اثر تغییر عرض پالس تراهرتز ورودی بر روی کیفیت بازسازی شکل موج پالس تراهرتز و همچنین اثر تغییر ضخامت کریستال بر روی دامنه پالس آشکار شده را مورد بررسی قرار داده ایم. بررسی پاسخ زمانی نشان می دهد که تطبیق فاز ایده آل برای کریستال های فوق الذکر به ترتیب در طول موج های ۸۰۰ nm، ۱۰۶۰ nm و ۱۵۵۰ nm صورت می گیرد. علاوه بر این، سیگنال الکترواپتیک آشکار شده با استفاده از کریستال ZnTe، دارای دامنه بالاتری نسبت به سیگنال آشکار شده توسط سایر کریستال های مورد بحث می باشد. کریستال GaP نیز جهت اندازه گیری پالس های تراهرتز کوتاه تر، نتایج بهتری</p>	

را نشان می‌دهد. بررسی پاسخ طیفی تابع فیلتر برای این چهار کریستال در طول موج‌های متفاوت پالس لیزر (۸۰۰ nm، ۱۰۶۰ nm و ۱۵۵۰ nm)، نشان می‌دهد که جهت آشکارسازی بهینه فرکانس-های مطلوب و دسترسی به حساسیت قابل قبول سیگنال الکترواپتیک اندازه‌گیری شده، نه تنها انتخاب مناسب کریستال و ضخامت آن ضروری می‌باشد بلکه انتخاب طول موج مناسب پالس لیزر ورودی نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

فہرست مطالب، شکل ہا و جداول

فهرست مطالب

۱ فصل اول: مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه ۲

۲-۱ معرفی امواج تراهرتز ۳

۳-۱ کاربردهای تراهرتز ۶

۴-۱ منابع تراهرتز ۷

۵-۱ آشکارسازهای تراهرتز ۱۱

۱-۵-۱ آشکارسازهای گرمایی ۱۲

۱-۱-۵-۱ بلومترها ۱۳

۲-۱-۵-۱ Golay Cells ۱۴

۳-۱-۵-۱ آشکارسازهای پیروالکتريک ۱۵

۲-۵-۱ آشکارسازی هیتروداين ۱۶

۳-۵-۱ سیستم فوتوميکسر ۱۸

۴-۵-۱ آشکارسازی پالس تراهرتز با استفاده از آنتن نور-رسانش ۱۹

۵-۵-۱ آشکارسازی پالس تراهرتز با استفاده از روش نمونه برداری الکترواپتيک ۲۱

۶-۱ سیستم طيفسنجی حوزه زمان تراهرتز ۲۳

۷-۱ مقایسه روش های PCA و EOS جهت آشکارسازی پالس های تراهرتز ۲۵

۸-۱ بررسی کارهای انجام شده ۲۸

۲ فصل دوم: مبانی و روش ها

۱-۲ معرفی اثر الکترواپتيک ۳۶

۱-۱-۲ اثر الکترواپتيک خطی در یک کریستال غيرهمسانگرد ۳۶

- ۲-۱-۲ اثر الکترواپتیک خطی در کریستال‌های زینک‌بلند..... ۳۷
- ۳-۱-۲ تعیین ضرائب شکست اصلی ۳۹
- ۲-۲ تداخل فرکانس مجموع و تفاضل ۴۲
- ۱-۲-۲ پلاریزاسیون الکترواپتیک ۴۳
- ۲-۲-۲ اندازه‌گیری مدولاسیون فاز با استفاده از تکنیک الیپسومتری ۴۹
- ۳-۲-۲ آشکارسازی سیگنال الکترواپتیک با استفاده از تکنیک الیپسومتری..... ۵۲
- ۴-۲-۲ حل تقریبی ۵۴

۳ فصل سوم: بحث و نتایج

- ۱-۳ شناسایی خصوصیات الکترواپتیک کریستال الکترواپتیک ۵۹
- ۱-۱-۳ تعیین ضریب شکست کریستال در طول موج‌های نوری ۵۹
- ۲-۱-۳ تعیین ضریب شکست و ضریب جذب کریستال در فرکانس‌های تراهرتز..... ۵۹
- ۳-۱-۳ مدل‌سازی وابستگی فرکانسی قابلیت غیرخطی مؤثر مرتبه دوم کریستال الکترواپتیک ۶۳
- ۲-۳ انتشار و اعوجاج پالس تراهرتز در کریستال الکترواپتیک ۶۴
- ۳-۳ مدل‌سازی سیگنال الکترواپتیک اندازه‌گیری شده با استفاده از روش EOS ۶۸
- ۱-۳-۳ اثر عدم تطبیق فاز مابین سرعت فاز پالس تراهرتز ورودی و سرعت گروه پالس لیزر ۶۸
- ۲-۳-۳ اثر تغییر عرض پالس تراهرتز بر روی کیفیت بازسازی شکل موج سیگنال آشکارشده..... ۷۴
- ۳-۳-۳ اثر تغییر ضخامت کریستال بر روی دامنه سیگنال الکترواپتیک ۷۵
- ۴-۳-۳ اثر انعکاس‌های چندگانه در کریستال بر روی سیگنال الکترواپتیک ۷۷
- ۴-۳ شناسایی بازده الکترواپتیک با استفاده از مدل‌سازی تابع پاسخ..... ۷۸
- ۵-۳ نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۸۳

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: طیف الکترومغناطیسی ۵
- شکل ۲-۱: تولید گسیل تراهرتز در محیط غیرخطی ۸
- شکل ۳-۱: گسیل تراهرتز ناشی از شتاب الکترون‌ها ۱۰
- شکل ۴-۱: انتشار تراهرتز با استفاده از لیزر ۱۱
- شکل ۵-۱: آشکارسازهای هم‌دوس تراهرتز ۱۲
- شکل ۶-۱: نمودار طرح کلی آشکارساز گرمایی ۱۳
- شکل ۷-۱: یک بلومتر نمونه (سمت راست) و مدار آن (سمت چپ) ۱۴
- شکل ۸-۱: Golay Cell ۱۵
- شکل ۹-۱: یک آشکارساز پیروالکترونیک نمونه ۱۶
- شکل ۱۰-۱: نمودار طرح کلی آشکارساز هیتروداین ۱۷
- شکل ۱۱-۱: بلوک دیاگرام فوتومیکسر تراهرتز (شکل سمت راست)؛ روش آشکارسازی، زمانی که پرتو تراهرتز تولید شده به صورت مکانیکی بریده شده باشد (شکل سمت چپ) ۱۹
- شکل ۱۲-۱: آنتن آشکارساز نور-رسانش (شکل سمت راست)، کلید نور-رسانش (شکل سمت چپ) ۲۱
- شکل ۱۳-۱: نمودار طرح کلی یک مجموعه نمونه‌بردار الکترواپتیک ۲۳
- شکل ۱۴-۱: آرایش سیستم THz-TDS ۲۴
- شکل ۱۵-۱: سیستم تراهرتز: آشکارسازی با روش نمونه‌برداری الکترواپتیک فضای آزاد (شکل بالا)، آشکارسازی با آنتن نور-رسانش (شکل پایین) ۲۶

شکل ۱-۱۶: مقایسه شکل موج تراهرتز در حوزه زمان و حوزه فرکانس: آشکارسازی FSEOS (شکل سمت راست)، آشکارسازی توسط آنتن نور-رسانش (شکل سمت چپ). در هر دو مورد منبع تراهرتز یک آنتن نور-رسانش با ابعاد ۶۰ میکرومتر و شکاف ۵ میکرومتر می‌باشد. ۲۷

شکل ۱-۱۷: مقایسه شکل موج تراهرتز در حوزه زمان و حوزه فرکانس: آشکارسازی FSEOS (شکل سمت راست)، آشکارسازی توسط آنتن نور-رسانش (شکل سمت چپ). در هر دو مورد منبع تراهرتز یک آنتن نور-رسانش با ابعاد ۴۵ میکرومتر و شکاف ۵ میکرومتر می‌باشد. ۲۷

شکل ۱-۱۸: ضریب شکست در رژیم تراهرتز و ضریب شکست گروه در طول موج‌های مختلف، مربوط به ماده LAPC ۳۳

شکل ۱-۱۹: ضریب شکست در رژیم تراهرتز و ضریب شکست گروه در طول موج‌های مختلف، مربوط به ماده DAPC ۳۳

شکل ۲-۱: صفحه (1 1 0) در کریستال زینک‌تلوراید مکعبی (شکل سمت چپ)، سیستم مختصات (X, Y) در صفحه (1 1 0) (شکل سمت راست). پالس‌های تراهرتز و لیزر در راستای U_3 به این صفحه برخورد می‌کنند. ۳۹

شکل ۲-۲: ضریب شکست بیضی‌گون تصویر شده بر روی صفحه (1 1 0) کریستال ۴۱

شکل ۲-۳: چگونگی اندازه‌گیری مدولاسیون فاز با استفاده از تکنیک الیپسومتری ۵۰

شکل ۲-۴: شکل قطبش بیضی‌گون میدان الکتریکی بعد از عبور از تیغه ربع موج (منحنی مشکی) ۵۱

شکل ۲-۵: انتشار پالس نوری و پالس تراهرتز در کریستال الکترواپتیک ۵۷

شکل ۳-۱: بخش حقیقی $n(f)$ و بخش موهومی $\beta(f)$ ضریب شکست مختلط در ZnTe ۶۱

شکل ۳-۲: بخش حقیقی $n(f)$ و بخش موهومی $\beta(f)$ ضریب شکست مختلط در GaP ۶۱

شکل ۳-۳: بخش حقیقی $n(f)$ و بخش موهومی $\beta(f)$ ضریب شکست مختلط در GaAs ۶۱

شکل ۳-۴: بخش حقیقی $n(f)$ و بخش موهومی $\beta(f)$ ضریب شکست مختلط در InP ۶۲

شکل ۳-۵: وابستگی فرکانسی قابلیت غیرخطی مرتبه دوم در چند کریستال الکترواپتیک ۶۴

شکل ۳-۶: پالس تراهرتز دارای عرض ۲۰۰ فمتوثانیه ($\sigma = 200 \text{ fs}$) هنگام ورود به کریستال الکترواپتیک ۶۵

شکل ۳-۷: به ترتیب از چپ به راست و از بالا به پایین: انتشار پالس تراهرتز با عرض اولیه ۲۰۰ فمتوثانیه، در ده موقعیت در داخل ZnTe با ضخامت ۲۰۰ میکرومتر (نرمالیزه شده) ۶۷

شکل ۳-۸: سیگنال الکترواپتیک آشکارشده با استفاده از روش EOS، کریستال مورد استفاده: ZnTe با ضخامت ۱ mm، عرض پالس تراهرتز: ۲۰۰ fs، عرض پالس لیزر: ۵۰ fs، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۸۰۰ nm (شکل بالا)، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۱۵۵۰ nm (شکل پایین) ۷۰

شکل ۳-۹: سیگنال الکترواپتیک آشکارشده با استفاده از روش EOS، کریستال مورد استفاده: GaP با ضخامت ۱ mm، عرض پالس تراهرتز: ۷۰ fs، عرض پالس لیزر: ۵۰ fs، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۱۰۶۰ nm (شکل بالا)، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۸۰۰ nm (شکل پایین) ۷۱

شکل ۳-۱۰: سیگنال الکترواپتیک آشکارشده با استفاده از روش EOS، کریستال مورد استفاده: GaAs با ضخامت ۱ mm، عرض پالس تراهرتز: ۱۰۰ fs، عرض پالس لیزر: ۵۰ fs، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۱۵۵۰ nm (شکل بالا)، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۸۰۰ nm (شکل پایین) ۷۲

شکل ۳-۱۱: سیگنال الکترواپتیک آشکارشده با استفاده از روش EOS، کریستال مورد استفاده: InP با ضخامت ۱ mm، عرض پالس تراهرتز: ۱۰۰ fs، عرض پالس لیزر: ۵۰ fs، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۱۵۵۰ nm (شکل بالا)، طول موج مرکزی پالس لیزر: ۱۰۶۰ nm (شکل پایین) ۷۳

شکل ۳-۱۲: مقایسه شکل موج سیگنال‌های آشکار شده در کریستال ZnTe، ضخامت کریستالها μm ۳۰۰، طول موج مرکزی پالس لیزر ۸۰۰ nm، عرض پالس لیزر ۵۰ fs، عرض پالس تراهرتز ورودی ۲۰۰ (شکل سمت راست)، عرض پالس تراهرتز ورودی ۱۰۰ fs (شکل سمت چپ) ۷۴

شکل ۳-۱۳: مقایسه شکل موج سیگنال آشکار شده در کریستال ZnTe و GaP، ضخامت کریستال‌ها μm ۲۰۰، طول موج مرکزی پالس لیزر 800 nm ، عرض پالس لیزر 50 fs ، عرض پالس تراهرتز ورودی 150 fs ۷۵

شکل ۳-۱۴: اثر تغییر ضخامت کریستال بر روی دامنه و شکل سیگنال الکترواپتیک با کریستال ZnTe، عرض پالس تراهرتز 200 fs ، طول موج پالس نوری 800 nm و عرض پالس نوری 50 fs ۷۷

شکل ۳-۱۵: اثر فبری-پیرو در سیگنال آشکار شده با استفاده از کریستال ZnTe با ضخامت $200\text{ }\mu\text{m}$ ، عرض پالس تراهرتز 200 fs ، طول موج پالس نوری 800 nm و عرض پالس نوری 50 fs ۷۸

شکل ۳-۱۶: شبیه‌سازی تابع پاسخ برای ZnTe در طول موج‌های ورودی متفاوت: طول موج 800 nm و طول کریستال 1 mm و 0.2 mm ، طول موج 1060 nm و طول کریستال 1 mm و طول موج 1550 nm و طول کریستال 1 mm ۸۱

شکل ۳-۱۷: شبیه‌سازی تابع پاسخ برای GaP در طول موج‌های ورودی متفاوت: طول موج 800 nm و طول کریستال 1 mm ، طول موج 1060 nm و طول کریستال 1 mm و 0.2 mm ، طول موج 1550 nm و طول کریستال 1 mm ۸۱

شکل ۳-۱۸: شبیه‌سازی تابع پاسخ برای GaAs در طول موج‌های ورودی متفاوت: طول موج 800 nm و طول کریستال 1 mm ، طول موج 1060 nm و طول کریستال 1 mm و 0.2 mm ، طول موج 1550 nm و طول کریستال 1 mm ۸۲

شکل ۳-۱۹: شبیه‌سازی تابع پاسخ برای InP در طول موج‌های ورودی متفاوت: طول موج 800 nm و طول کریستال 1 mm ، طول موج 1060 nm و طول کریستال 1 mm و 0.2 mm ، طول موج 1550 nm و طول کریستال 1 mm و 0.2 mm ۸۲

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: پارامترهای s_i و λ_i در مدل ضریب شکست سلمییر در چند نیمه‌هادی نمونه ۵۹
- جدول ۲-۳: پارامترهای رابطه تابع دی‌الکتریک مختلط و رابطه وابستگی فرکانسی قابلیت غیرخطی مرتبه دوم در چند ماده نمونه ۶۰
- جدول ۳-۳: ضرائب شکست گروه و تراهرتز در طول موج‌ها و فرکانس‌های منتخب در کریستال‌های مورد بحث (نتایج عددی بدست آمده از روابط (۴-۳) و (۱۴-۳)) ۶۹

فصل اول:

مقدمه و بررسی منابع

۱ فصل اول: مقدمه و بررسی منابع

۱-۱ مقدمه

آشکارسازهای امواج تراهرتز دارای نقش کلیدی در طیف وسیعی از زمینه‌های کاربردی هستند. به‌طور مثال شناسایی مواد، تصویربرداری، تکنولوژی اطلاعات و مخابرات، توموگرافی، تشخیص سرطان، تجزیه و تحلیل ژنتیکی و اختریفیک از جمله مواردی هستند که از فناوری آشکارسازی امواج تراهرتز بهره می‌گیرند. بنابراین اهمیت توسعه فناوری‌های الکترواپتیکی جهت آشکارسازی گسیل‌های تراهرتز، غیرقابل چشم‌پوشی می‌باشد [۱]. در سال‌های اخیر، تولید و آشکارسازی پالس‌های تراهرتز به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در طیف‌سنجی و مطالعه پدیده‌های فوق سریع، مورد توجه دانشمندان بسیاری قرار گرفته است [۲ و ۳]. آشکارسازی پالس‌های تراهرتز، با استفاده از آنتن‌های نور-رسانش^۱ و یا با بکارگیری روش نمونه‌برداری الکترواپتیکی^۲ امکان‌پذیر می‌باشد. در این میان، استفاده از روش EOS، به دلیل دسترسی آسان‌تر به تجهیزات مورد نیاز جهت راه‌اندازی سیستم‌های نمونه‌بردار الکترواپتیکی تراهرتز و همچنین دسترسی به پهنای باند بیشتر، مورد استقبال فزاینده‌ای قرار گرفته است. بنابراین تلاش برای توسعه و بهبود بازدهی سیگنال آشکار شده در روش EOS، از جمله اهداف محققان می‌باشد [۴].

این پایان‌نامه در سه فصل تنظیم گردیده است. در فصل اول، ابتدا به‌طور مختصر به معرفی امواج تراهرتز و منابع آن خواهیم پرداخت. سپس انواع آشکارسازهای گسیل تراهرتز را مورد بررسی قرار می‌دهیم و در پایان، پژوهش‌های انجام شده در زمینه EOS را مرور خواهیم نمود. فصل دوم شامل بررسی اثر

¹ Photoconductive Antenna (PCA)

² Electro-Optic Sampling (EOS)

الکترواپتیک خطی در کریستال‌های زینک‌بلند^۱ و همچنین تشریح کامل آشکارسازی الکترواپتیک پالس تراهرتز در حوزه فرکانسی می‌باشد. در فصل سوم، ابتدا به شناسایی و مدل‌سازی خصوصیات الکترواپتیک کریستال‌های ZnTe، GaP، GaAs و InP و همچنین مدل‌سازی انتشار و اعوجاج پالس تراهرتز در کریستال الکترواپتیک می‌پردازیم. سپس، نتایج شبیه‌سازی سیگنال الکترواپتیک اندازه‌گیری شده با استفاده از روش EOS در کریستال‌های فوق‌الذکر، نشان داده خواهد شد. همچنین عوامل مختلفی که منجر به تأثیرگذاری بر روی کیفیت بازسازی شکل موج سیگنال آشکار شده می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پایان نیز با شبیه‌سازی تابع پاسخ در کریستال‌های مورد بحث، بازده الکترواپتیک در حوزه فرکانسی را بررسی خواهیم نمود.

۱-۲ معرفی امواج تراهرتز

تراهرتز^۲ یک واحد فرکانسی است که معادل با 10^{12} هرتز می‌باشد. در فیزیک، تراهرتز به عنوان گسیل‌های الکترومغناطیسی شناخته می‌شود که فرکانس انتشار آن‌ها مابین 10^{11} هرتز تا 10^{13} هرتز باشد. در طیف الکترومغناطیسی، این محدوده فرکانسی به ناحیه‌ای مابین نواحی ماکروویو و فرورسرخ مربوط می‌شود. امواج ناشی از این گسیل‌ها به اشعه T معروفند که T به اختصار بیانگر واژه تراهرتز می‌باشد. واحدهایی که غالباً مورد استفاده قرار می‌گیرند و تبدیل آن‌ها در فرکانس یک تراهرتز به شرح زیر می‌باشد [۵ و ۶ و ۷]:

$$\nu = 1 \text{ THz} = 1000 \text{ GHz}$$

$$\omega = 2\pi\nu = 6.28 \text{ THz}$$

$$\tau = 1/\nu = 1 \text{ ps}$$

$$\lambda = c/\nu = 0.3 \text{ mm} = 300 \mu\text{m}$$

^۱ zinblende

^۲ Terahertz (THz)

$$\bar{k} = k/2\pi = 1/\lambda = 33.3 \text{ cm}^{-1}$$

$$h\nu = \hbar\omega = 4.14 \text{ meV}$$

$$T = h\nu/k_B = 48 \text{ K}$$

که c سرعت نور در خلاء، h ثابت پلانک و k_B ثابت بولتزمن می‌باشد.

محدوده‌های متفاوت در طیف الکترومغناطیسی دارای خواص طیف‌سنجی منحصر به فردی هستند. به‌طور مثال فناوری‌های اپتیکی پوشش‌دهنده ناحیه فرسرخ و فناوری‌های الکترونیکی پوشش‌دهنده بخش ماکروویو در طیف الکترومغناطیسی هستند. از آنجایی که فرکانس‌های تراهرتز مابین نواحی فرسرخ دور و ماکروویو در طیف واقع شده‌اند، بنابراین جهت تولید و تشخیص گسیل تراهرتز بکارگیری فناوری‌های الکترونیکی و اپتیکی به‌طور توأمان اجتناب‌ناپذیر می‌باشد [۲ و ۳]. از گذشته‌های دور ترکیب فناوری‌های اپتیکی و الکترونیکی همواره با چالش‌های بزرگی همراه بوده است. این چالش‌ها غالباً به تفاوت‌های مابین الکترونیک و اپتیک نسبت داده می‌شود. بنابراین فقدان فناوری‌های مناسب جهت ساخت منابع و آشکارسازهای تراهرتز، منجر به نام‌گذاری باند تراهرتز با عنوان شکاف تراهرتز گردیده است. در سال‌های اخیر به دلیل بروز پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری‌های الکترونیکی و اپتیکی که به ترتیب پوشش‌دهنده بخش‌های فرکانس بالا و فرکانس پایین طیف الکترومغناطیسی می‌باشند، این شکاف تکنولوژیکی به سرعت در حال ناپدید شدن است. بدین ترتیب امکان دسترسی به باند تراهرتز فراهم گردیده است که این خود منجر به پیشرفت‌های پرشتابی در علم تراهرتز، هم در حوزه تحقیقات پایه‌ای و هم در حوزه کاربردی شده است [۳].

تا کنون یک تعریف استاندارد برای باند تراهرتز ارائه نشده است. تعریفی که عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرد شامل ناحیه طیفی مابین ۰/۱ تراهرتز تا ۳۰ تراهرتز می‌باشد، اگرچه محدوده ۳۰-۱۰ تراهرتز از باند فرسرخ دور نیز فراتر می‌رود و باند فرسرخ میانی را هم در بر می‌گیرد. در صورتی که با پالس‌های

تراهرتز با پهنای باند فوق وسیع^۱ کار کنیم، محدوده مابین ۰/۱-۱۰ تراهرتز را به عنوان باند تراهرتز در نظر می‌گیریم. باند تراهرتز با باندهای طیفی همسایه از جمله باند امواج میلی‌متری یا EHF، باند امواج زیرمیلی‌متری و باند فرورسرخ دور ادغام شده است. تعریف باند های فوق‌الذکر به صورت زیر می‌باشد [۵]:

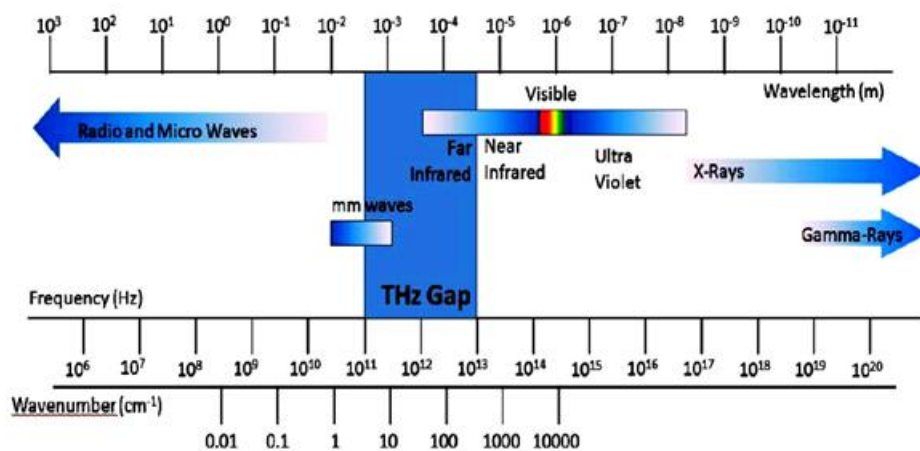
امواج میلی‌متری^۲ (MMW): ۱-۱۰ میلی‌متر، ۳۰-۳۰۰ گیگاهرتز، ۰/۳-۰/۰۳ تراهرتز.

امواج زیرمیلی‌متری^۳ (SMMW): ۱-۰/۱ میلی‌متر، ۳-۰/۳ تراهرتز.

گسیل فرورسرخ دور^۴ (Far-IR): (۳۵۰-۲۰۰) تا (۴۰-۲۵) میکرومتر، (۱۲-۷/۵) تا (۱/۵-۰/۸۶) تراهرتز.

گسیل زیرتراهرتز^۵: ۱-۰/۱ تراهرتز.

این باندها از طریق فناوری‌هایی که برای شناسایی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد، متمایز می‌شوند. سنسورها و امیترهای امواج میلی‌متری دستگاه‌های حالت جامد مبتنی بر فناوری‌های ماکروویو هستند. کاربردهای فرورسرخ دور نیز از دوران گذشته مبتنی بر دستگاه‌های گرمایی و نوری بوده است [۵].



شکل ۱-۱: طیف الکترومغناطیسی [۲]

¹ ultra broadband THz pulses

² Millimeter Wave

³ Sub-Millimeter Wave

⁴ Far Infrared Radiation

⁵ Sub-THz Radiation

پرتوهای تراهرتز قابل رؤیت نیستند. آشکارسازهای این پرتوها با استفاده از فناوری‌های الکترواپتیکی امکان‌پذیر خواهد بود. گسیل‌های تراهرتز نه تنها به صورت طبیعی رخ می‌دهند بلکه از طریق منابع تراهرتز نیز انتشار می‌یابند. پرتوهای تراهرتزی که به صورت طبیعی منتشر می‌شوند به راحتی در سیستم‌های تراهرتز قابل استفاده نیستند، چرا که این نوع گسیل‌ها غیر هم‌دوس^۱ می‌باشند [۸]. اشعه‌های T را می‌توان به دو نوع تابش‌های پالسی و تابش‌های موج پیوسته دسته‌بندی نمود. هر کدام از این انواع تابش‌ها دارای کاربردهای متفاوتی در زمینه‌های فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی و علم مواد هستند [۲ و ۹].

۱-۳ کاربردهای تراهرتز

خواص منحصر به فرد امواج تراهرتز همواره توجه دانشمندان بسیاری را به خود جلب نموده است. اگر چه راه‌اندازی سیستم‌های تراهرتز بسیار پرهزینه است و نیازمند فناوری‌های پیچیده‌ای می‌باشد، اما ارزشمندی نتایج و اطلاعات بدست آمده از راه‌اندازی چنین سیستم‌هایی بسیار چشمگیر است [۲]. یکی از زمینه‌های جذاب برای دانشمندان در حوزه تراهرتز، قطبیت^۲ مواد است. امواج تراهرتز نسبت به ساختارهای دو قطبی حساسند به طوری که ملکول‌های قطبی جذب بسیار بالایی را در این حوزه فرکانسی از خود نشان می‌دهند. طیف جذب تراهرتز جهت تعیین خواص ارتعاشی و دورانی مواد به شدت جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنین خواصی برای هر ماده‌ای منحصر به فرد است. بنابراین ناحیه تراهرتز به عنوان ناحیه‌ای که دارای اثر انگشت بسیاری از مواد می‌باشد، شناخته می‌شود [۱۰]. یکی دیگر از زمینه‌های مورد علاقه در حوزه تراهرتز یونیزاسیون مواد است. پایین بودن سطح انرژی فوتون‌های مربوط به اشعه‌های تراهرتز، این اشعه‌ها را در گروه پرتوهای غیر یونیزه قرار داده است. بنابراین تابش‌های تراهرتز برای بدن انسان مضر نیستند. از طرفی جذب بالای آب توسط گسیل‌های تراهرتز نیز امکان نفوذ عمیق آن‌ها را به داخل پوست مشکل می‌سازد. خاصیت غیر یونیزه بودن اشعه‌های تراهرتز همچنین منجر به بهره‌گیری از

^۱ incoherent

^۲ polarity