بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه یزد

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مخابرات

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق – مخابرات (میدان)

تزویج کننده جهتی تراهرتز مبتنی بر ساختار موجبری EBG

استاد راهنما

دکتر علی غفورزاده

استاد مشاور

دکتر مسعود موحدی

پژوهش و نگارش

زهـــره برامـــی

اسفند ۱۳۹۲

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

به آنان که

سپید موی گشتند تا سفید روی بمانم و خمیده قامت گشتند تا راست قامت بمانم و همواره دریای آبی قلبشان سرشار از مهربانی‌هاست و لحظات زیبای با آنان بودن، در را به روی غم‌هایم می‌بندد و بلندای استواری و محبت بی‌مانندشان همواره سرمشق من خواهد بود.

سپاس و ستایش خداوندی را که از ازل تا ابد

قابل اعتمادترین راهنما

و

بی‌منت‌ترین راه‌گشاست.

سپاس فراوان پروردگار سبحانی را که درِ رحمتِ بی‌پایانش را بی‌منّت بر همگان گشود. خوان کرمش را در پهنهٔ جهان گسترد و جملهٔ بندگانش را از سرچشمه حیات به نعمات بی حد خویش سیراب و متنعّم گردانید.

نخست از پدر و مادرم تشکر می‌کنم که از خود دریغ کردند و بی‌منت به من بخشیدند؛ آنان که تمامی کاستی‌هایم را با شکیبایی تحمل کردند. از اساتید ارجمندم جناب آقای دکتر علی غفورزاده و جناب آقای دکتر مسعود موحدی که در طول تمامی مراحل انجام پروژه صمیمانه مرا یاری کردند و از راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان همیشه بهره‌مند بودم، بسیار سپاسگزارم. از دوستان خوبم که روزهای خوبی را درکنارشان تجربه کردم، سپاسگزارم.

چکیده

امروزه محدوده فرکانسی امواج تراهرتز توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. یکی از مزایای امواج تراهرتز که سبب شده است فناوری تراهرتز در مخابرات پیشرفت گسترده‌ای داشته باشد، انتشار امواج تراهرتز در فضای آزاد با تلفات پراکندگی کم است. به علت افزایش تلفات عایقی در خطوط انتقال موجبری در محدوده فرکانسی امواج زیر میلی‌متری، معمولاً از موجبرهای توخالی در این باند استفاده می‌شود؛ ولی ساخت اینگونه موجبرها به دلیل ابعاد میکرومتری و بسیار کوچکی که دارند مشکل است. میکروماشین‌کاری در فرآیند ساخت می‌تواند به حل این مشکل کمک کند، اما در فرکانس‌های بالای ۵۰۰ گیگاهرتز موجبرها بسیار کوچک هستند. از این رو استفاده از روش‌های ماشین‌کاری معمولی برای ساخت آن‌ها، بسیار مشکل بوده و هزینه زیادی دارد. برای غلبه بر این مشکلات، تحقق موجبرهای مبتنی بر ساختارهای EBG به عنوان یک جایگزین کم هزینه و کم تلف مطرح شده است. در این پایان‌نامه طراحی یک تزویج‌کننده جهتی بر مبنای ساختار EBG با دو پست فلزی بر اساس فناوری MEMS انجام شده است. همچنین یک تزویج‌کننده هایبرید ۹۰ درجه با چهار پست فلزی با استفاده از دو روش پیشنهادی طراحی شده است. در نهایت تزویج‌کننده هایبرید ۱۸۰ درجه مبتنی بر موجبرهای دایروی طراحی شده است. در ساختار این تزویج‌کننده نیز چهار پست فلزی استفاده شده است تا تزویج در خروجی‌ها کنترل شود. تمام تزویج‌کننده‌های طراحی شده با یک، دو و سه ردیف ساختار EBG شبیه‌سازی شده‌اند. شبیه‌سازی تزویج‌کننده‌ها با دو و سه ردیف ساختار EBG به نتایج خوبی از قبیل تلفات بازگشتی خیلی کم در ورودی، ایزولاسیون مناسب و تقسیم توان مطلوب در خروجی‌ها منجر شده است. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که یک ردیف از ساختار EBG نمی‌تواند باند ممنوعه الکترومغناطیس را در محدوده فرکانسی مورد نظر به درستی ایجاد کند و استفاده از دو ردیف ساختار EBG می‌تواند بهترین جایگزین برای دیواره‌های کناری موجبرهای ساده باشد.

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها

فصل اول: کلیات

۱-۱مقدمه..... ۳

۱-۲ باند فرکانسی تراهرتز ۵

۱-۳ ضرورت استفاده از باند فرکانسی تراهرتز..... ۶

۱-۴ موجبرهای باند تراهرتز ۷

۱-۵ ضرورت استفاده از موجبرهای باند تراهرتز ۷

۱-۶ تزویج‌کننده‌ها مبتنی بر ساختار EBG ۱۰

۱-۷ ساختار پایان‌نامه..... ۱۱

فصل دوم: ساختارهای باند ممنوعه الکترومغناطیس (EBG)

۲-۱ معرفی ساختارهای پریودیک EBG..... ۱۵

۲-۱-۱ انواع ساختار EBG ۱۷

۲-۱-۱-۱ کریستال‌های سه بعدی EBG..... ۱۸

۲-۱-۱-۲ کریستال‌های EBG دو بعدی..... ۱۸

۲-۱-۱-۳ کریستال‌های یک بعدی EBG ۱۹

۲-۲ موجبرهای باند تراهرتز براساس ساختارهای EBG ۲۰

۲-۳ نمونه پیشنهادی موجبر تراهرتز EBG با استفاده از via..... ۲۰

۲-۴ تئوری انتشار موج در موجبرهای مستطیلی ۲۲

فصل سوم: تزویج‌کننده‌ها

۳-۱ شبکه‌های چهار دهانه ۲۷

۳-۲ تزویج‌کننده‌های هایبرید ۳۱

۳-۲-۱ هایبرید ۹۰ درجه ۳۱
۳-۲-۲ هایبرید ۱۸۰ درجه ۳۲
۳-۲-۲-۱ هایبرید T جادویی ۳۳
۳-۲-۲-۲ هایبرید Rat-Race ۳۶
۳-۳ انواع دیگر تزویج‌کننده‌های جهتی موجبری ۳۸
۳-۳-۱ تزویج‌کننده Beth-Hole ۳۹
۳-۳-۱-۱ طراحی تزویج‌کننده‌های بث-هول با یک روزنه ۴۰
۳-۳-۱-۲ طراحی تزویج‌کننده‌های دارای چند روزنه ۴۴
۳-۳-۲ تزویج کننده Riblet ۴۵
۳-۳-۳ تزویج‌کننده با هادی‌های متقاطع Moreno ۴۷

فصل چهارم: تحلیل و طراحی تزویج‌کننده‌های موجبری EBG در باند تراهرتز

۴-۱ طراحی موجبر مستطیلی با ساختار EBG ۵۱
۴-۲ طراحی مقسم توان T-Junction ۵۶
۴-۳ طراحی و شبیه‌سازی تزویج‌کننده جهتی چهاردهانه با استفاده از ساختار EBG.. ۵۹
۴-۴ تحلیل و طراحی تزویج‌کننده هایبرید تربیعی در باند تراهرتز مبتنی بر ساختار موجبری EBG... ..... ۶۶
۴-۵ تحلیل و طراحی تزویج‌کننده هایبرید حلقوی در باند تراهرتز مبتنی بر ساختار موجبری EBG ۷۶

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری ۸۷
۵-۲ پیشنهادات ۸۹

مراجع

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ الف) طیف فرکانسی و طول موجِ امواج الکترومغناطیسی. ب) کاربردها [۹] ۷

شکل ۲-۱ ساختار کریستالی فوتونی اولیه بوسیله یبلنویچ [۱۷] ۱۶

شکل ۲-۲ ساختار EBG سه بعدی [۲۲] ۱۸

شکل ۲-۳ ساختارهای EBG دو بعدی [۲۴]،[۲۵] ۱۹

شکل ۲-۴ ساختار EBG یک بعدی [۱۷] ۱۹

شکل ۲-۵ موجبر دو بعدی تراهرتز مبتنی بر ساختار EBG [۲۶] ۲۱

شکل ۲-۶ موجبر مستطیلی ساده [۲۷] ۲۲

شکل ۳-۱ دو نمونه ترکیب و تقسیم توان [۲۸] ۲۷

شکل ۳-۲ دو نشانه رایج برای تزویج‌کننده‌های جهتی [۲۸] ۲۷

شکل ۳-۳ هندسه یک تزویج‌کننده شاخه – خط [۳۰] ۳۲

شکل ۳-۴ نمادی برای یک اتصال هایبرید **180°** [۲۸] ۳۳

شکل ۳-۵ هایبرید T مجازی شامل چهار موجبر مستطیلی که به صورت سه بعدی و در یک نقطه به هم متصل شده‌اند [۲۸]. ۳۴

شکل ۳-۶ شبیه‌سازی هایبرید T جادویی در فرکانس ۵۰۰ گیگاهرتز با استفاده از نرم‌افزار HFSS ۳۵

شکل ۳-۷ پارامترهای پراکندگی حاصل از شبیه‌سازی هایبرید T جادویی در باند فرکانسی تراهرتز با استفاده از نرم‌افزار HFSS ۳۵

شکل ۳-۸ اختلاف فاز ۱۸۰- درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید T جادویی در فرکانس ۵۰۰ گیگاهرتز ۳۶

شکل ۳-۹ دو نمونه از هایبریدهای T جادویی که تیون شده و تطبیق خوبی دارد [33] الف) استفاده از دو پست فلزی. ب) استفاده از صفحات فلزی در ساختار تزویج‌کننده ۳۶

شکل ۳-۱۰ هایبرید حلقوی یا رت-ریس به شکل ریزنوارک یا خط نواری [۲۸]..... ۳۷
شکل ۳-۱۱ دو نسخه از تزویج‌کننده جهتی بث- هول الف) موجبرهای موازی ب) موجبرهای مورب (متقاطع) [۲۸] ۴۰
شکل ۳-۱۲ تزویج‌کننده جهتی بث – هول با یک روزنه در باند فرکانسی تراهرتز ۴۲
شکل ۳-۱۳ تزویج و جهت‌دهندگی بر حسب فرکانس برای تزویج‌کننده بث-هول با یک روزنه در باند تراهرتز..... ۴۳
شکل ۳-۱۴ عملکرد اساسی یک تزویج‌کننده جهتی با دو روزنه[۲۸]..... ۴۵
شکل ۳-۱۵ تزویج‌کننده جهتی موجبر با N+1 روزنه [۲۸] ۴۵
شکل ۳-۱۶ تزویج‌کننده ریبلت- سعد [۲۸]..... ۴۶
شکل ۳-۱۷ تزویج‌کننده با هادیهای متقاطع مورنو [۵۳] ۴۸
شکل ۴-۱ موجبر مستطیلی ساده با دیواره فلزی ۵۱
شکل ۴-۲ پارامتر پراکندگی S_{21} مربوط به موجبر مستطیلی ساده با دیواره‌های فلزی.... ۵۲
شکل ۴-۳ VSWR1 مربوط به موجبر مستطیلی ساده با دیوارههای فلزی ۵۲
شکل ۴-۴ توزیع میدان الکتریکی در موجبر EBG تراهرتز ۵۳
شکل ۴-۵ مقایسه VSWR بین موجبر مستطیلی ساده و موجبر با ۵ ردیف از ساختار EBG ۵۴
شکل ۴-۶ مقایسه S_{21} بین موجبر مستطیلی ساده و موجبر با ۵ ردیف از ساختار EBG. ۵۴
شکل ۴-۷ مقایسه S_{12} بین موجبر مستطیلی ساده و موجبر با ۵ ردیف، ۳ ردیف و ۲ ردیف از ساختار EBG..... ۵۵
شکل ۴-۸ مقایسه VSWR بین موجبر مستطیلی ساده و موجبر با ۵ ردیف، ۳ ردیف و ۲ ردیف از ساختار EBG ۵۵
شکل ۴-۹ موجبر مستطیلی با یک ردیف از ساختار EBG..... ۵۶
شکل ۴-۱۰ مقسم توان T مبتنی بر ساختار موجبری در فرکانس ۵۰۰ گیگاهرتز..... ۵۷

شکل ۴-۱۱ VSWR1 مربوط به مقسم توان T مبتنی بر موجبر مستطیلی ساده با دیواره-های فلزی ۵۷
شکل ۴-۱۲ خروجی‌های پورت ۲ و ۳ مربوط به مقسم توان T مبتنی بر موجبر مستطیلی ساده با دیواره‌های فلزی ۵۸
شکل ۴-۱۳ مقسم توان T مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG ۵۸
شکل ۴-۱۴ VSWR1 مربوط به مقسم توان T مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG..... ۵۹
شکل ۴-۱۵ خروجی‌های پورت ۲ و ۳ مربوط به مقسم توان T مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG ۵۹
شکل ۴-۱۶ تزویج‌کننده جهتی چهاردهانه با دو پست فلزی و مبتنی بر ساختار موجبری در باند فرکانسی تراهرتز ۶۰
شکل ۴-۱۷ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده جهتی مبتنی بر ساختار موجبری در باند فرکانسی تراهرتز ۶۰
شکل ۴-۱۸ تزویج‌کننده جهتی چهاردهانه با دو پست فلزی و مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۶۲
شکل ۴-۱۹ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده جهتی مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۶۲
شکل ۴-۲۰ تزویج‌کننده جهتی چهاردهانه با دو پست فلزی و مبتنی بر فناوری MEMS و دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۶۳
شکل ۴-۲۱ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده جهتی مبتنی بر فناوری MEMS و دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۶۴
شکل ۴-۲۲ مقایسه نمودارهای S_{11} تزویج‌کننده‌ها مربوط به ساختارهای موجبری. الف) موجبر معمولی (خط چین)، ب) موجبر دو ردیف EBG (خط پر)، ج) موجبر با سه ردیف EBG (نقطه چین) ۶۴

شکل ۴-۲۳ مقایسه نمودارهای S_{21} تزویج‌کننده‌ها مربوط بـه سـاختارهای مـوجبری. الـف) موجبر معمولی (خط چین)، ب) موجبر دو ردیف EBG (خط پر)، ج) موجبر با سـه ردیـف EBG (نقطه چین) ۶۴
شکل ۴-۲۴ مقایسه نمودارهای S_{31} تزویج‌کننده‌ها مربوط بـه سـاختارهای مـوجبری. الـف) موجبر معمولی (خط چین)، ب) موجبر دو ردیف EBG (خط پر)، ج) موجبر با سـه ردیـف EBG (نقطه چین) ۶۵
شکل ۴-۲۵ مقایسه نمودارهای S41 تزویج‌کننده‌ها مربوط به سـاختارهای مـوجبری. الـف) موجبر معمولی (خط چین)، ب) موجبر دو ردیف EBG (خط پر)، ج) موجبر با سـه ردیـف EBG (نقطه چین) ۶۵
شکل ۴-۲۶ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده جهتـی مبتنـی بـر فنـاوری MEMS و سـه ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۶۶
شکل ۴-۲۷ مدل خط انتقال مقسم توان T با نرم‌افزار ADS در فرکانس ۵۰۷ گیگاهرتز. ۶۷
شکل ۴-۲۸ مقسم توان T مبتنی بر موجبرهای فلزی با پارامترهای پراکندگی مشابه با مدل خط انتقال آن ۶۸
شکل ۴-۲۹ تزویج‌کننده هایبرید تربیعی حاصل از ترکیب چهار مقسـم تـوان T مبتنـی بـر موجبرهای فلزی در باند فرکانسی تراهرتز ۶۹
شکل ۴-۳۰ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننـده هایبریـد تربیعـی حاصـل از ترکیـب چهـار مقسم توان T در باند فرکانسی تراهرتز ۷۰
شکل ۴-۳۱ اختلاف فاز ۹۰ درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید تربیعی حاصل از ترکیب چهار مقسم توان T ۷۰
شکل ۴-۳۲ تزویج‌کننده هایبرید تربیعی مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۷۱
شکل ۴-۳۳ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده هایبرید تربیعی مبتنی بر دو ردیف سـاختار

EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۷۲
شکل ۴-۳۴ اختلاف فاز ۲۷۰- درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید تربیعی مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG ۷۲
شکل ۴-۳۵ تزویج‌کننده هایبرید تربیعی مبتنی بر موجبرهای فلزی در باند فرکانسی تراهرتز ۷۳
شکل ۴-۳۶ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده هایبرید تربیعی مبتنی بر موجبرهای فلزی در باند فرکانسی تراهرتز ۷۴
شکل ۴-۳۷ اختلاف فاز ۹۰ درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید مبتنی بر موجبر فلزی ۷۴
شکل ۴-۳۸ تزویج‌کننده هایبرید تراهرتز مبتنی بر ساختار موجبری EBG ۷۵
شکل ۴-۳۹ پارامترهای پراکندگی هایبرید مبتنی بر ساختار موجبری EBG ۷۵
شکل ۴-۴۰ اختلاف فاز ۲۷۰ درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید مبتنی بر ساختار EBG..... ۷۶
شکل ۴-۴۱ تزویج‌کننده هایبرید حلقوی مبتنی بر موجبرهای فلزی در باند تراهرتز..... ۷۷
شکل ۴-۴۲ پارامترهای پراکندگی تزویج‌کننده هایبرید حلقوی مبتنی بر موجبرهای فلزی در باند تراهرتز..... ۷۸
شکل ۴-۴۳ اختلاف فاز صفر درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید حلقوی مبتنی بر موجبرهای فلزی در باند تراهرتز..... ۷۸
شکل ۴-۴۴ تزویج‌کننده هایبرید حلقوی مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۷۹
شکل ۴-۴۵ رابطه بین وتر و کمان روبه رو به آن وتر در دایره..... ۸۰
شکل ۴-۴۶ پارامتر پراکندگی تزویج‌کننده هایبرید حلقوی مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG..... ۸۰

شکل ۴-۴۷ اختلاف فاز صفر درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید حلقوی مبتنی بر دو ردیف ساختار EBG ۸۱
شکل ۴-۴۸ تزویج‌کننده هایبرید حلقوی مبتنی بر فناوری MEMS و دو ردیف ساختار EBG در باند فرکانسی تراهرتز ۸۲
شکل ۴-۴۹ پارامتر پراکندگی تزویج‌کننده هایبرید حلقوی مبتنی بر فناوری MEMS و دو ردیف ساختار EBG ۸۲
شکل ۴-۵۰ اختلاف فاز ۱۸۰- درجه بین پورت‌های خروجی ۲ و ۳ در هایبرید حلقوی مبتنی بر سیلیکون و دو ردیف ساختار EBG ۸۳

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

در فرکانس‌های موج میلی‌متری و زیر میلی‌متری، نحوه اتصال اجزای تشکیل دهنده یک سیستم مثل فرستنده یا گیرنده که شامل عناصری از قبیل آنتن، فیلتر و غیره می‌باشند به صورت فیزیکی و یا تزویج الکترومغناطیسی، یک چالش مهم و اساسی به‌شمار می‌رود. در این حالت، طراحی مدار باید با در نظر گرفتن ملاحظات عملی انجام شود. فناوری موجبر کلاسیک هنوز یک راه اصلی برای طراحی سیستم‌های موج میلی‌متری با عملکرد خوب می‌باشد. اگر چه این روش تکامل یافته است ولی برای تولید انبوه با هزینه کم، مناسب نیست. ساخت و تنظیم پس از ساخت که دشوار و گران قیمت هستند یک مشکل اساسی برای تولید کنندگان می‌باشند. به علاوه روش موجبری قدیمی نمی‌تواند برای کاهش وزن و حجم به کار رود.

تعدادی از روش‌های طراحی مدارهای صفحه‌ای که با موجبر مستطیلی مجتمع شده‌اند گزارش شده‌اند که برای کاربردهای گسترده چندان جذاب نیست. زیرا طرح‌هایی که تاکنون پیشنهاد شده‌اند با توجه به مشکل بسته‌بندی و مجتمع کردن ادوات موج میلی‌متری با مشکل جدی در تولید انبوه مواجه می‌شوند. به علاوه، تطبیق امپدانس بین عناصر فعال دارای امپدانس کم (مانند دیودهای IMPATT) و مدارهای موجبری امپدانس بالا مشکل و حتی غیر ممکن است.

امروزه استفاده از ساختارهای ایجادکننده باند ممنوعه الکترومغناطیسی (EBG[1]) به طور وسیعی در طراحی فیلترهای با کیفیت و فشرده در فرکانس‌های بالا، ساخت آنتن‌های کوچک با بهره بسیار بالا، کم کردن تلفات عبوری حمل‌کننده‌های موج همانند مقسم‌های توان فرکانس بالا، حذف هارمونیک در تقویت‌کننده‌های توان و کم نویز و رسیدن به امپدانس‌های بسیار بالا استفاده می‌گردد. مدارهای فیلتری دارای باند ممنوعه، سیگنال‌های مخلوط شده با هارمونیک‌های مزاحم را از ورودی خود دریافت و سیگنال‌های بدون هارمونیک را بسته به میزان قابلیت فیلتر، به خروجی خود منتقل می‌نمایند [۱]. ساختارهای EBG توانایی دارند که امواج الکترومغناطیس را در سطحی انتشار دهند که قبل از این غیر ممکن بوده است [۲]. ساختار EBG راهکارهای طراحی متنوعی را

[1] - Electromagnetic Band Gap

برای محققان در زمینه‌ی ریزموج[1] و فتونیک[2] فراهم کرده است. آنچه امروز مورد توجه قرار گرفته است، یافتن کاربردهای واقعی و جزئیات مدل‌سازی آن‌ها است. به خاطر پتانسیل باور نکردنی ساختارهای EBG، کاربردهای بسیار زیادی از آن وجود دارد که امروزه به کار برده می‌شود. امروزه شرکت‌های جدیدی برای استفاده از پتانسیل‌های تجاری این فناوری ایجاد شده‌اند [۳-۴].

ساختارهای EBG به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارند در جوامع علمی به طور گسترده و فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. به طور کلی، ساختارهای EBG ساختارهای پریودیک مصنوعی هستند که از انتشار امواج الکترومغناطیس در باند فرکانسی تعیین شده برای همه‌ی زاویه‌های برخورد و تمام حالات پلاریزه[3] جلوگیری می‌کنند [۴]. ساختارهای EBG به عنوان بخشی از ادوات ریزموج، به منظور افزایش بازده دستگاه، به ویژه افزایش الگوی تابش (بهره) و کاهش نویز (تلفات) در انتقال استفاده می‌شود. ساختارهای EBG به دلیل توانایی‌شان برای تضعیف امواج سطحی در فرکانس کار مرکزی، به عنوان سطوح با امپدانس بالا شناخته می‌شوند. در سال‌های اخیر، رشد سریعی در استفاده از ساختار EBG در الکترومغناطیس و آنتن‌ها شکل گرفته است [۵-۶].

اصطلاح EBG بر مبنای مجموع انعکاس داخلی، پدیده‌ی کریستال فتونیک در اپتیک، به وجود آمده است که با ساختار پریودیک شناخته شده است [۷]. فناوری EBG هنوز در مراحل اولیه‌ی خود است و هر چند مثال‌های پیاده شده زیادی از EBG وجود دارند اما نیاز است تا این مساله بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که این فناوری با بسیاری از فرآیندهای ساخت مدارهای مجتمع یکپارچه ریزموجی سازگار است، می‌توان انتظار پیشرفت شدید و رو به رشدی از آن، در بسیاری از کاربردهای فرکانس بالا داشت. به علاوه، پدیدار شدن فناوری‌های جدید، توسعه-ی EBGها را رشد غیر منتظره خواهد داد، این فناوری‌ها شامل فناوری نانو، مواد ویژه یا کم اتلاف، مدارهای مجتمع فوتونیک، سیستم‌های روی چیپ موج میلی‌متری و موارد بسیار دیگری می‌باشد. در اینجا هدف، استفاده از ساختار پریودیک EBG برای طراحی تزویج‌کننده‌ها در باند فرکانسی

[1] - Microwave
[2] - Photonics
[3] - All polarization states

تراهرتز می‌باشد.

۱-۲ باند فرکانسی تراهرتز

مردم هر روز از انرژی الکترومغناطیس استفاده می‌کنند. یکی از بخش‌های فرکانسی که در طیف الکترومغناطیس، مورد توجه زیادی قرار گرفته، بخش تراهرتز است. اولین کاربرد اصطلاح تراهرتز در سال ۱۹۷۴ به فلمینگ[۱] نسبت داده شده است، که این اصطلاح برای توصیف پوشش فرکانس خط طیفی از یک تداخل‌سنج مایکلسون[۲]، مورد استفاده قرار گرفت. یک سال پیش از آن کریسمن[۳] در یک مقاله خلاصه شده کنفرانسی IEEE MTT-S، تراهرتز را به پوشش فرکانسی آشکارسازهای دیود تماس نقطه‌ای نسبت داد. اشلی[۴] و پالکا[۵] برای اشاره کردن به فرکانس تشدید یک لیزر آب، تراهرتز را به کار برده‌اند [۸].

واژه تراهرتز برای جنبه‌های مختلفی استفاده می‌شود که به عنوان مثال می‌توان به مواردی از قبیل فرکانس‌های زیر مادون قرمز، پوشش فرکانسی از آشکارسازهای دیود اتصال نقطه‌ای، پوشش فرکانسی خط طیفی یک تداخل‌سنج مایکلسون[۶] و فرکانس رزونانس از لیزر آب اشاره کرد. در حال حاضر تراهرتز به محدوده طول موج زیر میلی‌متری بین 100μm-1000μm (3-300 GHz THz) اطلاق می‌شود [۸]. در مراجع مختلف این بازه فرکانسی متفاوت است و در برخی تا فرکانس ۱۰ تراهرتز را مربوط به باند فرکانسی امواج تراهرتز می‌دانند. اما بازه‌ای که تاکنون از نظر عملی مورد استفاده قرار گرفته از ۳۰۰ گیگاهرتز تا ۳ تراهرتز بوده است و بقیه‌ی این باند فرکانسی هنوز به صورت شکاف تراهرتز[۷] باقی مانده است.

محدوده تراهرتز در طیف الکترومغناطیس شکاف تراهرتز نامیده می‌شود، زیرا تا همین اواخر هیچ منبع و آشکارساز مناسب سیگنال تراهرتز وجود نداشت به طوری که بخش تراهرتز از طیف

---

[1] - Fleming
[2] - Michelson interferometer
[3] - Kerecman
[4] - Ashley
[5] - Palka
[6] - Michelson interferometer
[7] - THz gap

فرکانسی الکترومغناطیسی که بین امواج مایکروویو و فناوری نوری قرار دارد تقریباً به صورت کاربردی مورد استفاده قرار نمی‌گرفت [۹].

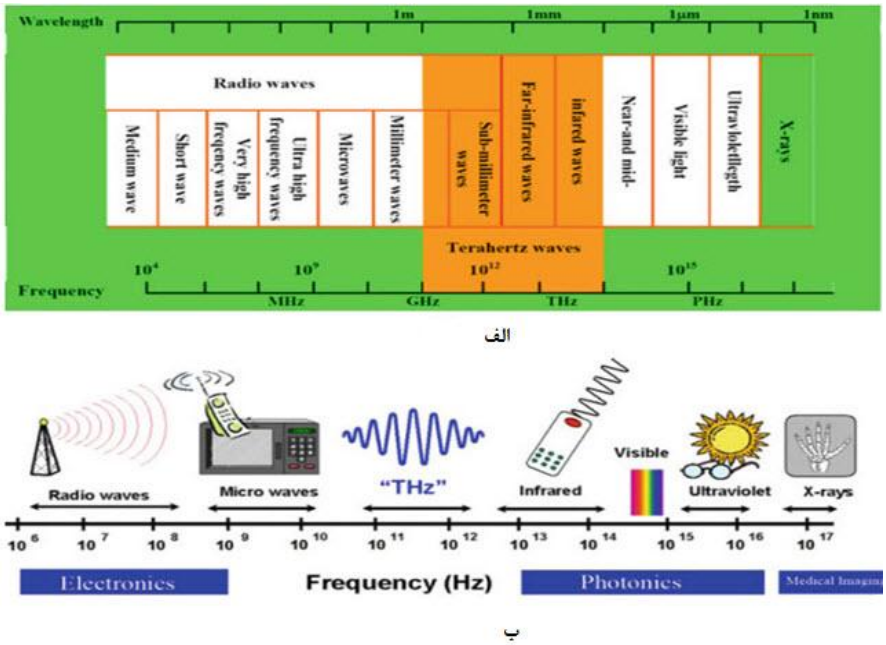
۱-۳ ضرورت استفاده از باند فرکانسی تراهرتز

تحقیقات مربوط به طیف تراهرتز تا 3THz در دستاوردهای فنی و پیاده‌سازی‌های تجاری از رشد چشم گیری در سال‌های اخیر برخوردار بوده است. این پیشرفت در زمینه‌های کاربردی وسیعی مانند شیمی، طیف‌سنجی و نجومی، پزشکی و بیولوژیکی، دفاعی و امنیتی، شبکه‌های ارتباطی نسل بعدی و رادارها، صنعت نیمه‌هادی و غیره است. قسمت اعظم تکنولوژی تراهرتز از مجموعه‌هایی از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی منشأ گرفته است که در مقایسه با فرکانس‌های ریزموج وضوح بالا و پهنای باند بیشتری دارد. علاوه بر این، انتشار تراهرتز در فضای آزاد تلفات پراکندگی کمتری نسبت به انتشار امواج مادون قرمز و نور مرئی در فضای آزاد دارد، بنابراین سیستم‌های تراهرتز در جاهایی که امواج مادون قرمز و نور مرئی نمی‌توانند عمل کنند مثلاً در دود، ابر، طوفان شن و ماسه، قادر به عملکردِ خوبی هستند [۱۰].

بسیاری از کاربردهای تراهرتز با پیشرفت منابع و آشکارسازهای تراهرتز به واقعیت نزدیک‌تر شده است. همان طور که در اواخر دهه ۸۰ اثبات شد، کریستال‌های الکترومغناطیس یکی از فعال‌ترین زمینه های پژوهش در ریزموج و مهندسی نوری شده است، در قیاس با کریستال‌های نیمه هادی، کریستال‌های الکترومغناطیس به علت پراکندگی متعدد ساختارهای پریودیک فلزی و دی الکتریک آن‌ها، می‌توانند برای به کار بردن جریان امواج الکترومغناطیس مورد استفاده قرار گیرند. یکی از پدیده‌های اساسی، منع انتشار امواج الکترومغناطیسی در جهت خاص یا منع انتشار در هر جهت در باند فرکانسی خاص است، که آن را شکاف باند الکترومغناطیسی (EBG) می‌نامند [۱۰]. امواج تراهرتز در ساختارهای پریودیک EBG عملکرد خوبی دارند.

اگر تکنولوژی تراهرتز کم هزینه و ساده باشد با توجه به انبوه مزیت‌هایی که دارد، می‌تواند جایگزین تکنولوژی‌های دیگر شود اما فعلاً به دلیل اینکه، منابع وآشکارسازهای آن هم سیستم‌های

پیچیده‌ای دارند و هم نیاز صد در صد به خنک‌کننده‌ها دارند، تکنولوژی گران‌قیمت و پرهزینه‌ای محسوب می‌شود. سعی بر این است که هزینه‌های آن پایین بیاید و به طور عمده از این تکنولوژی استفاده شود.



شکل۱-۱ الف) طیف فرکانسی و طول موجِ امواج الکترومغناطیسی. ب) کاربردها [۹].

۱-۴ موجبرهای باند تراهرتز

یکی از زمینه‌هایی که در تکنولوژی تراهرتز مورد توجه و تحقیقات زیادی قرار گرفته است، ساختارهای موجبری در این باند هستند. به دلیل خواص ویژه مواد در فرکانس‌های تراهرتز، استفاده از موجبرها در این باند دارای ملاحظات ویژه‌ای است. البته بسیاری از ساختارها و انواع موجبرهایی که در سیستم‌های باند تراهرتز استفاده می‌شوند، از ساختارهای موجبری در دیگر باندهای فرکانسی نظیر فرکانس‌های نوری و ریزموج بهره می‌گیرند. علاوه بر موجبرهای این دو باند، موجبرهای با ایده انتشار پلاسمونیک نیز در فرکانس‌های تراهرتز کاربرد فراوانی دارند [۱۱].

۱-۵ ضرورت استفاده از موجبرهای باند تراهرتز

موجبرها علاوه بر کاربرد به عنوان محیط انتقال موج، بلوک سازنده بسیاری از ادوات مانند

فیلتر، کوپلر و سوییچ نیز هستند. موجبرهای تراهرتز در ساختار برخی منابع تراهرتز نیز نقش دارند. بنابراین تحلیل و طراحی موجبرهای مناسب برای باند تراهرتز و به‌کارگیری این موجبرها در ساختار ادوات مختلف در این باند دارای اهمیت بالایی است. در دهه گذشته تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تولید و آشکارسازی امواج تراهرتز صورت گرفته است و روش‌های متنوعی برای استفاده از این امواج در کاربردهایی از قبیل طیف‌سنجی و تصویربرداری ارائه شده است. با این وجود موجبرهای تراهرتز هنوز یک مسئله چالشی است. در بیشتر مطالعات انجام شده، انتشار فضای آزاد امواج تراهرتز مبنای کار بوده است، اما در برخی کاربردها امکان استفاده از انتشار فضای آزاد امواج تراهرتز وجود ندارد و نیاز به انتشار هدایت شده این امواج است. بنابراین گسترش موجبرهای تراهرتز یکی از زمینه‌های بسیار مورد توجه است. ساختار موجبرها در باند تراهرتز را می‌توان به دو دسته کلی موجبرهای عایقی و موجبرهای فلزی تقسیم‌بندی کرد. بیشتر موجبرهای بررسی شده برای باند تراهرتز برگرفته از ساختارهای موجبری مورد استفاده در باندهای اپتیک (موجبرهای عایقی) و ریزموج (موجبرهای فلزی) هستند. مواد دی الکتریک در باند تراهرتز دارای تلف جذبی بالایی هستند. از سوی دیگر، عمق نفوذ در فلزات نیز در باند تراهرتز کاهش می‌یابد. به این ترتیب، دستیابی به موجبرهای کم تلف در باند تراهرتز بسیار دشوار است. از سوی دیگر کاربردهای مبتنی بر طیف‌سنجی تراهرتز نیازمند پهنای باند بسیار بالایی هستند. این کاربردها به موجبرهایی با پاشندگی بسیار پایین نیاز دارند که پالس‌های پیکو ثانیه‌ی تراهرتز را با کمترین اعوجاج انتقال دهند. قابلیت محصورسازی مکانی انرژی نیز از دیگر پارامترهای مهم در موجبرها است. دستیابی به تلف پایین پاشندگی ناچیز و محصورسازی مکانی بالا توسط یک ساختار موجبری میسر نیست، در واقع، در بیشتر ساختارهای موجبری یک مصالحه بین این فاکتورها برقرار است. به طور معمول، دستیابی به محصورسازی بالاتر به افزایش تلف و پاشندگی منجر می‌شود. به منظور کاهش تلف، بیشتر موجبرهای تراهرتز به نحوی طراحی می‌شوند که انتقال موج در فضای آزاد صورت پذیرد [۱۲].

اولین مطالعات در زمینه موجبرهای تراهرتز بر استفاده از خطوط مایکرواستریپ تمرکز