



دانشکده برق و کامپیوتر
گروه الکترونیک

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته الکترونیک گرایش مدارات مجتمع نوری

عنوان

بررسی کاهش سرعت نور در موجبر طراحی شده با بلور فوتونی یک بعدی
متماتریال

اساتید راهنما

دکتر علی رستمی

دکتر رضا یدی پور

استاد مشاور

دکتر حسن رسولی

پژوهشگر

حسین عرفانی نیا

آبان ماه ۱۳۹۰



به پاس

تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار

و

از خودگذشتگان

به پاس

عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان

که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس

قلب های بزرگشان که فریاد رس است و

سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و

به پاس

محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می کنم

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانم، از اساتید عزیز و گرانمایه‌ام جناب دکتر علی رستمی و جناب آقای دکتر رضاییدی پور که راهنمایی پایان نامه بنده را در طی این مدت قبول نموده‌اند و از جناب آقای دکتر حسن رسولی که به بنده مشاوره دادند، نهایت تشکر و قدردانی نمایم و از تمام کسانی که برایم زحمت کشیده و همیشه دعاگوی من بوده‌اند، کمال تشکر را دارم.

<p>نام خانوادگی : عرفانی نیا</p> <p>نام : حسین</p>
<p>عنوان پایان نامه : بررسی کاهش سرعت نور در موجبر طراحی شده با بلور فوتونی یک بعدی متامتریال</p>
<p>اساتید راهنما : دکتر علی رستمی و دکتر رضا یدی پور</p> <p>استاد مشاور : دکتر حسن رسولی</p>
<p>مقطع تحصیلی : کارشناسی ارشد</p> <p>رشته : مهندسی برق - الکترونیک</p> <p>گرایش : طراحی مدارات مجتمع نوری</p> <p>دانشگاه : تبریز</p> <p>دانشکده : برق و کامپیوتر</p>
<p>کلید واژه ها : متامتریال ، نور کند ، ساختار چند لایه ، سرعت گروه نور</p>
<p>چکیده :</p> <p>توانایی برای کنترل و ایجاد تأخیر کاملاً نوری یا متوقف کردن سیگنال‌های نوری یکی از ایده‌های بزرگ برای شبکه‌های مخابراتی و پردازش سیگنال است که اخیراً مهندسان و جامعه دانشمند را به کار در این زمینه ترغیب نموده است. اخیراً روش‌های مختلفی را از جمله روش شفافیت القایی مغناطیسی (EIT) و تقویت کننده‌های نوری مبتنی بر نقطه‌های کوانتومی (QDSOA) و ساختارهای فوتونیک کریستال (PhC) و ... پیشنهاد داده‌اند که هر کدام دارای مزایا و همچنین معایباتی می‌باشند. یکی دیگر از روش‌های مؤثر و نوین برای کاهش سرعت نور استفاده از موجبرهای متامتریال می‌باشد. در اینجا ما با استفاده از موجبرهای متامتریال و پیشنهاد ساختارهای مختلف قصد داریم تا سرعت گروه نور را در شرایط تلفاتی کاهش دهیم. بر این اساس دو نوع ساختار غیرفعال و فعال معرفی می‌شود، که در ساختارهای غیرفعال با پوسته چند لایه، اثر منفی وجود تلف را کاهش داده و عواملی که باعث دور شدن سرعت گروه از مقدار صفر شده را به حداقل</p>

رساندیم و توانستیم دوباره سرعت گروه نور را نسبت به ساختار پایه در حالت تلفاتی به مقدار قابل توجهی کاهش دهیم، هرچند در این ساختار به دلایل محدودیت‌هایی نمی‌توانیم سرعت را صفر کنیم ولی با انتخاب مقادیر بهینه برای ضرایب شکست و ضخامت‌ها تلاش کردیم بیشترین مقدار کاهش را نتیجه بگیریم. از طرف دیگر با پیشنهاد ساختاری فعال، که طی آن با کوپل بخشی از نور ورودی به لایه پوششی ساختار پایه، سعی کردیم که این سرعت را دوباره به مقدار صفر برگردانیم. ضمن اینکه برای هر کدام از این روش‌ها محاسبات و نمودارهای مربوطه را بدست آورده‌ایم.

فهرست مطالب

VII		فهرست اشکال
X		فهرست جداول
XI		مقدمه
۱	فصل اول : بررسی منابع	
۲	۱-۱- مقدمه‌ای بر متامتریال	
۳	۲-۱- شیوه‌های ساخت مواد متامتریال	
۶	۳-۱- ویژگی‌های منحصربه‌فرد متامتریال	
۶	۱-۳-۱- ضریب شکست منفی در متامتریال	
۸	۲-۳-۱- معکوس شدن قانون اسنل	
۹	۳-۳-۱- سرعت فاز منفی	
۱۰	۴-۳-۱- معکوس شدن اثر داپلر و چرنکوف	
۱۰	۴-۱- کاربردهای متامتریال	
۱۲	۵-۱- موجبرنوری متامتریالی	
۱۵	۶-۱- نور کند در موجبرهای متامتریال	
۱۶	۷-۱- شیفیت عرضی گوس - هنجین	
۱۸	فصل دوم: روابط انتشار مدها در موجبر متامتریال	
۱۹	۱-۲- مقدمه	
۱۹	۲-۲- رابطه ریاضی برای مد انتشاری در موجبر متامتریال	
۲۳	۳-۲- مقایسه بین موجبرهای متدوال و متامتریالی	
۲۶	۴-۲- رابطه ضریب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی با فرکانس	
۲۷	۵-۲- مدهای هدایتی برای موجبر متامتریال	
۲۷	۱-۵-۲- موجبر با لایه متامتریال بدون تلفات	
۳۰	۲-۵-۲- موجبر با لایه متامتریال دارای تلفات	
۳۱	۶-۲- مجموع توان ، سرعت گروه و چگالی انرژی در موجبرهای متامتریال	
۳۱	۱-۶-۲- موجبرهای متامتریال ایده‌آل و بدون تلف	
۳۴	۲-۶-۲- موجبرهای متامتریال واقعی و دارای تلف	

۳۶	۷-۲- نقش تلفات ذاتی مواد متامتریال در مدهای نور کند
۳۶	۷-۲-۱- موجبر متامتریالی با هسته مخروطی شکل
۳۹	۷-۲-۲- تلفات و تأثیر آن در تغییر سرعت گروه
۴۴	فصل سوم: روش‌های پیشنهادی و محاسبه نتایج
۴۵	۱-۳- ساخت ماده متامتریال بدون تلف با استفاده از تقویت کننده
۴۷	۲-۳- جبران تلفات نوری در ساختار موجبر متامتریالی تلفاتی توسط تقویت کننده در هسته
۴۹	۳-۳- جبران تلفات نوری در ساختار موجبر متامتریالی تلفاتی توسط تقویت در پوسته
۵۰	۳-۴- کاهش سرعت گروه در موجبر متامتریالی تلفاتی با ساختار چند لایه
۵۱	۳-۴-۱- رابطه انتشار مد برای موجبر متامتریالی چند لایه
۵۴	۳-۴-۲- رابطه انعکاس در مرز مشترک هسته و پوسته در موجبر متامتریالی چند لایه
۵۸	۳-۴-۳- آنالیز عددی ساختار موجبر متامتریالی چند لایه
۶۷	۳-۴-۴- استفاده از ماده تک - منفی در ساختار چند لایه
۷۰	۳-۴-۵- کوپلبخشی از نور ورودی به لایه آخر موجبر نوری
۷۵	۳-۵- ساختار موجبر متامتریال چند لایه با هسته و پوسته مخروطی شکل
۷۷	۳-۶- نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۹	منابع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- جهت میدانهای E, H, S و بردار موج k ۳
- شکل ۲-۱- مختصری بر تاریخچه ساخت متمتریال ۵
- شکل ۳-۱- عبور نور از میان مرز بین ماده ۲,۱ با ضریب شکست مثبت برای ماده اول و ضریب شکست منفی برای ماده دوم ۹
- شکل ۴-۱- مقایسه انتشار و جهت جریان انرژی و سرعت گروه با جهت انتشار سرعت فاز در مواد متمتریالی ۹
- شکل ۵-۱- (الف) ساختار یک لنز محدب معمولی - (ب) ساختار یک لنز تخت با استفاده از لایه متمتریال ۱۰
- شکل ۶-۱- مسیر موج نوری از یک سیستم نامرئی ساز کروی با ویژگیهای متمتریال ۱۱
- شکل ۷-۱- حوزه کاربردهای متمتریال در سالهای اخیر ۱۲
- شکل ۸-۱- وجود جریان گردابی انرژی در سطح مشترک ماده متمتریال و دی الکتریک در ساختار موجبر متمتریال ۱۳
- شکل ۹-۱- ساختار شیفت گوس - همچنین در سطح مشترک دو ماده (۱) و (۲) ۱۶
- شکل ۱۰-۱- تعداد مقالات منتشر شده در زمینه ضریب شکست منفی در هر سال از ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ ۱۷
- شکل ۱-۲- ساختار یک موجبر متمتریالی متقارن ۲۰
- شکل ۲-۲- تصویر گرافیکی الگوی ریمان مدهای TE برای (الف) موجبر دی الکتریک و (ب) موجبر متمتریال ۲۴
- شکل ۳-۲- (الف) ضریب دی الکتریک و ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مربوط به ماده متمتریال وابسته به تابع درود و لورنتس ۲۷
- شکل ۴-۲- منحنیهای انتشاری مد برای ساختار موجبری. ۲۸
- شکل ۵-۲- (الف) قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر منحنیهای انتشار موجبری متمتریال با حضور تلفات برای مدهای TM بر حسب فرکانس - (ب) قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر همان ساختار - منحنیها بر اساس پارامترهای ساختار شکل ۴-۲ رسم شده اند. ۳۰
- شکل ۶-۲- منحنی مجموع توان نرمالیزه شده برای مد TM_2 ساختار موجبری متمتریال بدون تلف ۳۲
- شکل ۷-۲- نمودار سرعت گروه برای ساختار موجبری متمتریال بدون تلف ۳۳
- شکل ۸-۲- منحنی مجموع توان نرمالیزه شده برای مد TM_2 ساختار موجبری متمتریال تلفاتی ۳۴
- شکل ۹-۲- منحنی سرعت گروه برای مد TM_2 ساختار موجبری متمتریال تلفاتی با لایه متمتریال ۳۵
- شکل ۱۰-۲- نمایی از موجبر متمتریالی گوه‌ای شکل پیشنهاد شده توسط تیساکمادیس و همکارانش در سال ۲۰۰۷ ۳۶
- شکل ۱۱-۲- منحنی انتشار برای مد TM_2 ساختار پیشنهادی ۳۷
- شکل ۱۲-۲- منحنی سرعت گروه متناظر با مد TM_2 ساختار پیشنهادی ۳۸
- شکل ۱۳-۲- بررسی شیفت منفی عرضی در سطح مشترک ماده متمتریال و ماده دیالکتریک در یک موجبر متمتریال ۳۹
- شکل ۱۴-۲- امواج ورودی، عبوری و بازتابی زمانیکه ماده ۱ از نوع دیالکتریک و ماده ۲ از نوع متمتریال هستند. ۴۰
- شکل ۱۵-۲- میزان بازتاب از سطح مشترک بین ماده دی الکتریک و ماده متمتریال در حالت هدایت در شرایط بدون تلف و با حضور تلف ۴۲
- شکل ۱۶-۲- شیفت عرضی گوس - همچنین در سطح مشترک ماده دی الکتریک و متمتریال در شرایط بدون تلف و در حضور تلف ۴۲

- شکل ۳-۱- تصویر ساختار جفت تورماهی که در آن دو صفحه نقره‌ای در یک ماده دی‌الکتریکی جاسازی شده‌اند. ۴۶
- شکل ۳-۲- (الف) قسمت موهومی اصلاح شده ضریب شکست مؤثر- (ب) جذب و (ج) نسبت قسمت حقیقی به موهومی برای میزان پمپهای از ۱/۵ تا ۲/۱ با گامهای ۰/۱ ۴۶
- شکل ۳-۳- اثر تقویت کننده بر روی ضریب شکست مؤثر و سرعت گروه - (الف) اثر بهره بر روی سرعت گروه در ساختار ۴۷
- شکل ۳-۴- پیکربندی ساختار موجبر متامتریالی برای جبران کامل تلفاتی که از هسته ماده متامتریالی ناشی شده است ۴۹
- شکل ۳-۵- تغییرات قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر با فرکانس در جاییکه ساختار دارای تلف و تقویت است و بدون تلف و تقویت و دارای تلف و بدون تقویت و بدون تلف و بدون تقویت میباشد. ۵۰
- شکل ۳-۶- نمایی از ساختار پیشنهادی موجبر متامتریال چند لایه متقارن ۵۱
- شکل ۳-۷- پیکربندی یک بازتابنده با ساختار چندلایه تک بعدی ۵۴
- شکل ۳-۸- (الف) نمودارهای انتشار مد برای مدهای TM_2 - (ب) نمودارهای سرعت گروه برای همان ساختارها ۵۹
- شکل ۳-۹- نمودارهای اندازه انعکاس از مرز مشترک هسته و پوسته برای مدهای مستقیم TM_2 ساختارها ۶۰
- شکل ۳-۱۰- مقایسه سرعت گروه بین ساختارهای دولایه و سه لایه پوششی ۶۳
- شکل ۳-۱۱- نمودارهای اندازه انعکاس از مرز مشترک هسته و پوسته برای مدهای مستقیم TM_2 ساختارها ۶۴
- شکل ۳-۱۲- (الف) منحنی‌های سرعت گروه ۶۶
- شکل ۳-۱۳- پیکربندی قرار گرفتن لایه‌ای از ماده دی‌الکتریک در کنار لایه‌ای از ماده تک- منفی مغناطیسی ۶۸
- شکل ۳-۱۴- (الف) اندازه انعکاس - (ب) اندازه عبور در مرز مشترک نور ورودی از هوا به لایه ماده تک - منفی . ۶۹
- شکل ۳-۱۵- مقایسه سرعت گروه بین ساختارهای دولایه پوششی با لایه آخر هوا و سه لایه پوششی با لایه اضافه شده تک - منفی مغناطیسی به همان ساختار. ۷۰
- شکل ۳-۱۶- پیکربندی ساختار موجبر چند لایه با نور خروجی از نوع نور منتشر شده در هسته اعمال شده به لایه آخر ۷۱
- شکل ۳-۱۷- مقایسه منحنی‌های مربوط به مدهای TM_2 ساختار موجبر چند لایه ۷۳
- شکل ۳-۱۸- مقایسه سرعت گروه با افزایش دامنه نور اعمالی خارجی بر اساس پارامترهای ۷۴
- شکل ۳-۱۹- رابطه بین نسبت دامنه نور اعمالی خارجی به میزان سرعت گروه در نقطه بحرانی ۷۵
- شکل ۳-۲۰- پیکربندی ساختار موجبر متامتریالی چند لایه با هسته و پوسته مخروطی شکل ۷۶

فهرست جداول

۶	جدول ۱-۱- ضریب شکست منفی درحوزه فرکانس‌های نوری
۶۱	جدول ۱-۳- مقایسه اندازه و فاز انعکاس درنقطه بحرانی درساخترهای پیشنهادی در شکل ۳-۸
۶۴	جدول ۲-۳- مقایسه پارامترهای اندازه و فاز انعکاس و سرعت گروه درنقطه بحرانی
۷۷	جدول ۳-۳- مقایسه اندازه ضخامت هسته ولایه اول پوسته برای فرکانس‌های مختلف در موجبرمتمتریالی چندلایه

در این پایان نامه قصد داریم تا به معرفی مواد متامتریالی و موجبرهای متامتریال به عنوان ساختاری جدید برای کاهش سرعت نور و توقف آن بپردازیم. ما ویژگی‌ها و خصوصیات منحصر به فرد این نوع مواد را بیان کرده و روابط انتشار در حالت بدون تلفات و با حضور تلف را بدست می‌آوریم. ضمن اینکه نقش تلف را در تغییرات انتشار مورد بررسی قرار داده و روش‌هایی برای جبران این پدیده در ساختار پیشنهاد خواهیم کرد. بر این اساس:

در فصل اول، مقدمه‌ای را درباره ماده متامتریال مطرح کرده و درباره نحوه ساخت آن صحبت می‌کنیم و برخی از ویژگی‌ها و کاربردهای غیرمعمول این مواد را برمی‌شماریم.

در فصل دوم، منحنی‌های انتشار یک ساختار موجبر متامتریالی را مطالعه می‌کنیم. مهمترین بخش این فصل درباره درک اثر ضریب شکست منفی ماده متامتریال در انتشار است. به طور خاص نشان می‌دهیم که ویژگی‌های منحنی‌های انتشار موجبر متامتریال به طور کلی با موجبرهای معمول متفاوت است. در این فصل همچنین درباره اثر تلفات و جذب در مدهای ساختارهای موجبری متامتریال بحث خواهیم کرد. ما نشان می‌دهیم که منحنی‌های انتشار در حضور تلف ذاتی تغییر معناداری می‌کنند و باعث فاصله گرفتن سرعت نور از مقدار صفر می‌شود.

در فصل سوم، روش‌های جبران تلف برای کاهش سرعت نور توسط تقویت کننده‌های نوری را بررسی کرده و سپس روش‌های پیشنهادی خودمان را با ساختارهای غیرفعال برای کاهش سرعت گروه نور، توضیح می‌دهیم. در این بخش ما از ساختارهای موجبر متامتریالی برای جبران تغییر در شیفت عرضی در مرز مشترک بین هسته و پوسته بهره می‌بریم. در ادامه روابط انتشار مربوطه را بدست آورده و منحنی‌های آن را رسم می‌کنیم و مقدار بهینه را برای تعداد لایه‌ها پیدا می‌کنیم.

فصل اول : بررسی منابع

۱-۱- مقدمه‌ای بر متامتریال^۱

در سال‌های اخیر، مواد متامتریال بدلیل داشتن ویژگی‌ها و خصوصیات ویژه و غیرمعمولی که از خود نشان داده‌اند مورد توجه قرار گرفته‌اند و در کاربردهایی از جمله لنزهای کامل [۱] و ابزارهای نامرئی ساز [۲] تا موجبرهای نوری [۳] به کار گرفته شده‌اند. متامتریال‌ها در طبقه بندی مواد، جزء مواد مصنوعی می‌باشند که دارای ویژگی‌های الکترومغناطیسی ویژه‌ای هستند که در طبیعت یافت نمی‌شوند. این ویژگی‌های غیر طبیعی توسط اجزای تشکیل دهنده و مواد طبیعی بدست نمی‌آیند، بلکه ساختارهای ساخت بشر هستند که از طول موج‌های درگیر در این ساختارها نیز کوچکترند. این ساختارها که به متامتریال معروف هستند، مشابه اتم‌های مصنوعی عمل کرده و می‌توانند با مؤلفه‌های میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی امواج الکترومغناطیسی جفت شوند و ویژگی‌های نوری جدید همچون ضریب شکست منفی را نتیجه دهند.

متامتریال پیشینه طولانی دارد و این می‌تواند تا حدی باعث شگفتی شود. برای نمونه، جام یاقوتی دوران قرون وسطی می‌تواند اولین متامتریال قلمداد شود [۴]. در این جام یاقوتی، ذره‌های کوچک در مقیاس نانو از طلا به کار رفته است (۵ تا ۶۰ نانومتر) که رنگ غیرمعمول به جام می‌داد. در واقع وضعیت تشدید پلاسمایی سطحی که در ذرات طلا صورت می‌گرفت سبب رنگ غیر عادی جام می‌گردید. این نور وابسته به اندازه ذرات طلای به کار رفته و جهت نور، قرمز یا سبز به نظر می‌رسید.

اما ما نام متامتریال را در قرن اخیر به وفور می‌بینیم، به طور نمونه، می‌توان به ساخت دی الکتریک‌های مصنوعی برای لنزهای آنتن میکروویو توسط کوک^۲ در سال ۱۹۴۵ [۵] اشاره کرد. هرچند ما امروزه متامتریال را با متولد شدن آن در آزمایشگاهی در دانشگاه کالیفرنیا و در سن دیگو در ابتدای قرن اخیر (سال ۲۰۰۰ میلادی)، زمانیکه دکتر اسمیت^۳ و تیمش در آزمایش خود با دلیل، ماده‌ای با ضریب دی الکتریک منفی و ضریب القایی مغناطیسی منفی را در محدوده‌ای از فرکانس‌های میکروویو نشان دادند، می‌شناسیم [۶].

ایده مواد متامتریال با ضریب دی الکتریک و ضریب القایی مغناطیسی همزمان منفی را ابتدا دکتر ویکتور وسلایگو^۴ در سال ۱۹۶۸ مطرح کرد [۷]. او این نوع مواد را موادی که از قاعده دست چپ^۵ پیروی می‌کنند نام نهاد، بدلیل اینکه میدان‌های مغناطیسی (\vec{H}) و الکتریکی (\vec{E}) و بردار موج (\vec{K}) در مقایسه با حالت معمول که با دست راست تعریف می‌شوند از دست چپ تبعیت می‌کردند. در این بررسی وسلایگو نشان داد که محور توان (\vec{S}) یک موج الکترومغناطیسی با بردار موج (\vec{K}) آن در خلاف جهت است، در نتیجه انتشار نور در خلاف

1- Metamaterial

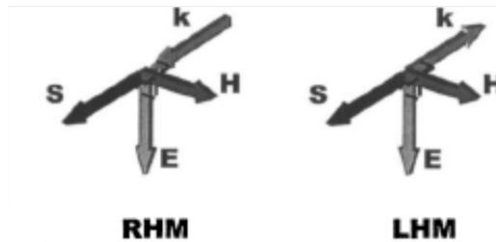
2- Koak

3- Smith

4- Victor Veselago

5- Left Handed Material (LHM)

جهت جریان انرژی است. این یافته به تعدادی ویژگی‌های غیرمعمول در مواد متامتریال از جمله ضریب شکست منفی و معکوس شدن تشعشع چرنکوف^۱ و عوض شدن شیفت داپلر^۲ و معکوس شدن قانون اسنل^۳ انجامید این انقلاب در ویژگی‌ها، باعث ایجاد کاربردهای جدید و باورنکردنی همچون ابزارهای نامرئی کننده نیز شد.



شکل ۱-۱- جهت میدان‌های E, H, S و بردار موج k در موادی با تبعیت از قاعده دست راست (RHM) و قاعده دست چپ (LHM)

۱-۲- شیوه‌های ساخت مواد متامتریال

برخی از ویژگی‌های نامتعارف و شگفت انگیز مواد متامتریال در سال‌ها پیش بررسی شده و بدست آمده بودند. به عنوان نمونه، آقای آرتور شوستر^۴، منفی بودن سرعت فاز (\vec{V}_{ph}) و نتایج آن را در سال ۱۹۰۴ نشان داد [۸] و دیمیتری سیوخین^۵ در سال ۱۹۵۷، به غیر هم جهت بودن جریان انرژی (\vec{S}) و سرعت فاز (\vec{V}_{ph}) در موادی که از قانون دست چپ تبعیت می‌کنند، پی برد [۹]. هر چند کار دکتر وسلانگو در معرفی متامتریال، جزو اولین تعاریف کلی و جامع بود که تا زمان ساخت اولین متامتریال در سال ۲۰۰۰، چندان مورد توجه دانشمندان قرار نگرفت. اسمیت و همکارانش در ساخت اولین متامتریال با ثابت دی‌الکتریک ϵ و نفوذپذیری مغناطیسی μ منفی، بر طبق ایده آقای جان پندری^۶ عمل کردند [۱۰]. آنها ساختاری متشکل از حلقه‌های شکافدار فلزی^۷ طراحی کردند که در برخی از فرکانس‌های خاص، ضریب نفوذپذیری μ ، مقدار منفی از خود نشان می‌داد. ساختاری که توسط پندری پیشنهاد شده بود، بصورت فعال دارای خاصیت مغناطیسی است هر چند با مواد غیر مغناطیسی ساخته شده باشد. تا اینجا ضریب نفوذپذیری منفی حاصل شده است، برای اینکه ثابت دی‌الکتریک

1- Cherenkov radiation
 2- Doppler shift
 3 - Snell's law
 4 - Sir Arthur Schuster
 5 - Dimitriy Sivukhin
 6 - John Pendry
 7 - Split Ring Resonator (SRR)

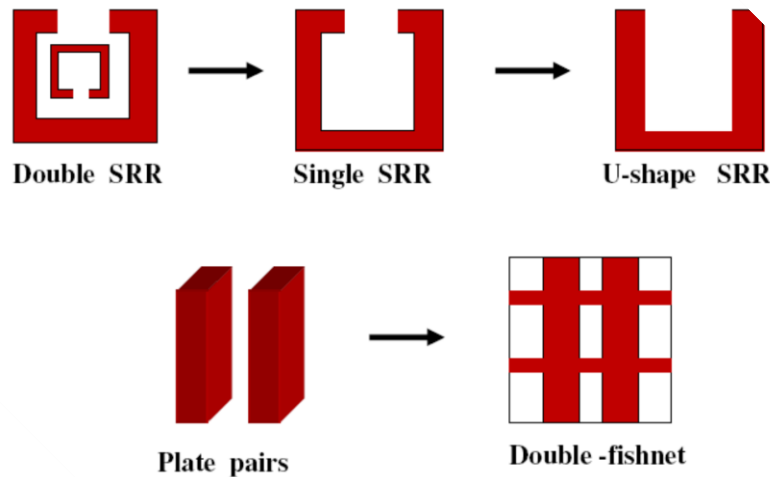
نیز به طور همزمان منفی گردد ، سیم‌های فلزی^۱ را در شبکه‌های منظمی با حلقه‌های رزوناتور شکافدار به صورت متناوب، می‌چینند. با استفاده از همین چیدمان و کنار هم قراردادن سیم‌های فلزی و حلقه‌های شکافدار، اسمیت و همکارانش در سال ۲۰۰۱ توانستند ضریب شکست منفی را نشان داده و وجود آن را اثبات کنند [۱۱]. اولین مواد متامتریال در فرکانس‌های میکروویو معرفی شدند با وجود اینکه بیشترین پتانسیل کاربردهای آنها در حوزه نوری بود. مشکل اصلی در رساندن متامتریال به فرکانس‌های نوری این بود که برای ایجاد همچین موادی در چنین فرکانس‌هایی نیاز به تغییر اندازه دادن اتم‌های مصنوعی از میلیمتر به نانومتر بود. به هر حال پیشرفت‌های حاصل شده در فناوری نانو باعث شد که دانشمندان بتوانند به این هدف وارد شوند و دست کم فقط پس از ساخت اولین متامتریال، متامتریالی در فرکانس‌های مادون قرمز (780 nm) ساخته شود [۱۲]. البته برخی از مشکلات بحرانی همچنان پابرجا و بدون جواب مانده‌است. یکی از مهمترین مسائلی که در استفاده از متامتریال در کاربردهای پرشمار، ما را ناتوان ساخته است، وجود تلفات معنادار در ماده متامتریالی است [۱۳، ۱۴]. تلفات بالا از نیاز به مواد متامتریالی منجر می‌شود، که دارای فلزی باشند که در حوزه نوری به عنوان هادی کامل عمل کنند و این یک مسئله اساسی در این حوزه می‌باشد. تلفات در بهترین متامتریال‌های طراحی شده تا به امروز که در (جدول ۱-۱) آمده‌اند بسیار بالاتر از آن چیزی است که بتواند برای بیشتر کاربردها، عملی باشد.

یکی دیگر از مشکلات در ساخت مواد متامتریال، مشکل توسعه ساختارهای متامتریالی در بستر سه بعدی و بصورت همگن می‌باشد. هر چند اخیراً والتین^۲ و همکارانش موفق به ساخت یک ساختار سه بعدی در فرکانس‌های مادون قرمز^۳ شده‌اند [۱۵] که این ساختار پیشنهاد شده نمی‌تواند یک ساختار متامتریالی سه بعدی واقعی باشد به دلیل اینکه فقط برای محدوده‌ای کم دامنه از راستا و همچنین تک قطبش^۴ از نور ورودی کار می‌کند [۱۶].

در ابتدا متامتریال‌ها از جفت حلقه رزوناتور شکافدار و سیم‌های موازی تشکیل می‌یافتند. با تغییر شکل و استفاده از تک حلقه به جای جفت حلقه و کاهش اندازه ساختار ، مقدار فرکانس متامتریال به حدود 200 THz رسید. هرچند با این حرکت رو به جلو، دستیابی به فرکانسی بالاتر از این امکان پذیر نبود بدلیل اینکه ترکیب حلقه‌ها و سیم‌های فلزی موازی در اندازه‌های نانو بسیار حساس هستند و کار را برای اندازه‌گیری میزان عبور و شکست در جهت راستای سطح حلقه بسیار مشکل می‌کنند، بعلاوه فلز بکار گرفته شده در حلقه رزوناتور به شدت در این فرکانس و فرکانس‌های بالاتر، از یک رسانای ایده‌آل فاصله می‌گیرد. از این رو

1- metallic wires
2 - Valentine
3- infrared
4- polarization

گروه‌های متعددی دست به کار شدند تا از راه‌های دیگری به متامتریال‌هایی در فرکانس‌های بالاتر دست پیدا کنند [۱۸,۱۷]. طراحی‌های جدید شامل جفت سیم فلزی یا صفحه فلزی بودند که توسط یک جداکننده دی‌الکتریکی، از هم جدا می‌شدند. این جفت سیم‌ها با این شکل می‌توانند مانند حلقه‌های رزوناتور شکافدار عمل کرده و یک ضریب نفوذپذیری μ منفی در بعضی از محدوده‌های فرکانسی بدهد، بعلاوه این جفت سیم‌ها می‌توانند بصورت همزمان یک ضریب دی‌الکتریک ϵ منفی را نیز نتیجه دهد. اگرچه پیدا کردن ناحیه‌ای که در آن هر دوی این ضرایب، مقدار منفی داشته باشند در ساختارهایی با جفت سیم‌های فلزی به تنهایی، کار مشکلی است. از این رو طراحی جدیدی در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد شد که به آن اصطلاحاً ساختار جفت تورماهی^۱ می‌گفتند که در آن جفت فلز به ترتیبی خاص استفاده شده است [۱۳]. با استفاده از این ساختار، گروه‌های متعددی ضریب شکست منفی در نزدیکی طیف نوری مرئی گزارش دادند [۱۴]. با این حال در این ساختارها نیز، متامتریال با تلفات بالا بدلیل حضور فلز مواجه است. در شکل ۱-۲ مختصری از این پیشرفت در ساخت متامتریال نشان داده شده است .



شکل ۱-۲- مختصری بر تاریخچه ساخت متامتریال : از ساختارهای حلقه رزوناتور شکافدار تا ساختارهایی با اصطلاح تورماهی

ضمن اینکه در (جدول ۱-۱) تعدادی از متامتریال‌ها با ضرایب شکست منفی را که بصورت موفق مشاهده شده‌اند آورده‌ایم .

جدول ۱-۱- ضریب شکست منفی در حوزه فرکانس‌های نوری

سال و منبع	ضریب شکست (n')	طول موج (μm)	$F = \frac{ n' }{n''}$
سال ۲۰۰۵			
[۱۷]	-0.3	1.5	0.1
[۱۸]	-2	2	0.5
سال ۲۰۰۶			
[۱۹]	-4	1.8	2
[۲۰]	-1	1.4	3
[۱۲]	-0.6	0.78	0.5
سال ۲۰۰۷			
[۲۱]	-1	2	0.5

۳-۱- ویژگی‌های منحصر به فرد متامتریال

۱-۳-۱- ضریب شکست منفی در متامتریال

پیش از این ما درباره‌ی یکی از خصوصیات و ویژگی‌های غیرمعمول متامتریال‌ها که ضریب شکست منفی است توضیح داده بودیم. مطالعات تجربی متعددی این ویژگی در متامتریال را تأیید کرده‌اند. بعلاوه گروه‌های مختلفی بصورت ریاضی نشان داده‌اند که در متامتریال، ضریب شکست بایستی منفی باشد. به همین منظور به صورت کامل نشان می‌دهیم که چرا ضریب شکست در متامتریال منفی است.

ما انتشار یک موج تخت را در متامتریال با میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی زیر بررسی می‌کنیم:

$$E(r, t) = \text{Re}\{E \exp[i(k \cdot r - \omega t)]\} \quad (۱-۱)$$

$$H(r, t) = \text{Re}\{H \exp[i(k \cdot r - \omega t)]\}$$

از معادله ماکسول داریم:

$$k \times E = i \frac{\omega}{c} \mu H, \quad k \times H = -i \frac{\omega}{c} \varepsilon E \quad (۲-۱)$$

در جایگاه ε و μ به ترتیب ضرایب دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی می‌باشند و k بردار موج است که

بصورت زیر تعریف می شود :

$$k^2 = \frac{\omega^2 \epsilon \mu}{c^2} \quad (۳-۱)$$

از رابطه (۲-۱) می توانیم اثبات کنیم که اگر ضرایب دی الکتریک و نفوذپذیری همزمان منفی باشند، محورهای ما در مقایسه با زمانی که این ضرایب به طور همزمان مثبت هستند، از قاعده دست چپ به جای دست راست پیروی خواهند کرد. البته در صورتی که یکی از این ضرایب منفی باشد، نمی توان از این سیستم بهره برد بدلیل اینکه بردار موج در این مورد دارای قسمت موهومی خواهد شد. در مرحله بعد نشان می دهیم که سرعت فاز یک موج با حرکت جریان انرژی همان موج در ماده متامتریال در خلاف جهت هم هستند. ما یک میدان الکتریکی با قطبش در جهت \hat{p} در نظر می گیریم ($E = \hat{p}$). با استفاده از معادلات ماکسول و قضیه جریان انرژی داریم :

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(E \times H^*) = \frac{c}{2\omega\mu} \hat{p} \times (k \times \hat{p}), = \frac{ck}{2\omega\mu} \quad (۴-۱)$$

نتیجه ای که از این رابطه حاصل می شود این است که اگر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی منفی باشد، جهت جریان انرژی و بردار موج با هم مخالف می باشند. به طور مشابه می توان برای قطبش در جهت \hat{z} نیز نشان داد که اگر در این حالت ضریب دی الکتریک منفی باشد، نتیجه قبل تکرار خواهد شد. پس در مواد متامتریال با ضرایب دی الکتریک و نفوذپذیری منفی، در هر حالت از قطبش، این دو محور در راستایی خلاف راستای هم خواهند بود.

نکته ای که باید به آن توجه کرد این است که از رابطه $n^2 = \epsilon\mu$ و در صورتی که ϵ و μ هر دو منفی باشند، نمی توان منفی بودن ضریب شکست را نشان داد. پاسخ های مثبت و منفی برای ضریب شکست از رابطه مذکور با توجه به معادلات ماکسول و شرایط مرزی برای شکست نور قابل قبول می باشند، هر چند برای ارضاء کردن پاسخ منفی برای ضریب شکست در مواد متامتریال، نیازمند این هستیم که جریان انرژی در نور شکست پیدا کرده در سطح مشترک، از این سطح دور شود. انتخاب ضریب شکست منفی در متامتریال ها بصورت کامل در مقاله [۲۲] توضیح داده شده است. در اینجا ما فقط با استدلالی ساده به بررسی مشخصه ضریب منفی در متامتریال همراه با تلفات می پردازیم.

در یک ماده متامتریالی تلفاتی ، ضرایب دی الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی بصورت مختلط می باشند:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad \varepsilon' < 0, \varepsilon'' > 0 \quad (5-1)$$

$$\mu = \mu' + i\mu'' \quad \mu' < 0, \mu'' > 0$$

می خواهیم نشان دهیم که قسمت حقیقی ضریب شکست باید منفی باشد . از این رو با توجه به رابطه $n^2 = \varepsilon\mu$ برای یک ماده با تلفات بسیار کوچک خواهیم داشت :

$$n = \pm \sqrt{(\varepsilon'\mu' - \varepsilon''\mu'') + i(\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu')} \quad (6-1)$$

$$n \approx \pm \left[\varepsilon'\mu' + i \frac{\varepsilon'\mu'' + \varepsilon''\mu'}{2\varepsilon'\mu'} \right]$$

با توجه به رابطه بالا به این نتیجه دست پیدا می کنیم که برای مثبت شدن بخش موهومی ضریب شکست، باید پاسخ با علامت منفی را انتخاب کنیم که در آن صورت بخش حقیقی ضریب شکست در مواد متامتریالی منفی خواهد شد.

لازم به یادآوری است که در اینجا ما شرح مختصری از آنچه که در مورد متامتریال پیش از این رفته، آورده ایم و درباره بخشی از کاربردهای آن که با ساختار موجبری ارتباط دارد، تأکید کرده ایم. ما تلاش نداریم که تمام کاربردهای متامتریالها را شرح دهیم بلکه با آوردن نمونه هایی از تجارب علمی کسب شده اخیر، قصد داریم تا پیش زمینه ای برای بهتر فهمیدن ویژگی های این مواد برای شما مهیا سازیم.

۱-۳-۲- معکوس شدن قانون اسنل

بر طبق قانون اسنل ، نوری که از ماده دی الکتریک وارد ماده متامتریالی می شود دچار شکست خواهد شد ولی این شکست در خلاف شکستی است که در دو ماده دی الکتریک و بصورت معمول مشاهده می گردد، که در ادامه به توضیح آن می پردازیم. قانون اسنل بصورت زیر تعریف می شود :

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \theta} = \frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (7-1)$$

این رابطه شکل کاملی از رابطه اسنل است که در آن φ زاویه ورودی و θ زاویه شکست است. در اینجا پارامتر P بدین صورت تعریف می شود:

$$P = \begin{vmatrix} k_x & k_y & k_z \\ e_x & e_y & e_z \\ h_x & h_y & h_z \end{vmatrix} \quad (8-1)$$

با فرض اینکه دو ماده (۱) و (۲) هر دو از مواد دی الکتریک باشند و ضرایب شکست آنها به ترتیب $n_1 > 0$ و $n_2 > 0$ باشند، پاسخ دترمینان بالا (+) خواهد شد و نور شکست یافته با زاویه مثبت نسبت به خط عمود که