

مروری بر جاذب‌های امواج الکترو مغناطیسی مبتنی بر پلیمر

محمود حیدری

تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی، گروه
مهندسی شیمی.

چکیده ...

سازوکارهای اصلی جذب امواج الکترومغناطیسی شامل اتلاف دی‌الکتریک (قطبش دوقطبی، قطبش بین‌سطحی، اتلاف رسانایی) و اتلاف مغناطیسی (رزونانس طبیعی و تبادل، جریان‌های گردابی) و اتلاف ساختاری (پراکندگی، بازتاب‌های داخلی و اثرات حفره‌ای) هستند که به ترکیب، مورفولوژی و معماری مولکولی وابسته است. پلیمرها به دلیل چگالی پایین، فرایندپذیری مناسب، ایجاد پایداری شیمیایی و امکان مهندسی ساختار به گزینه‌ای کارآمد برای استفاده در جاذب امواج الکترومغناطیسی تبدیل شده‌اند. با این حال، ماهیت عایق و غیرمغناطیسی بیشتر پلیمرها به‌کارگیری پرکننده‌های رسانا و مغناطیسی را برای ایجاد سازوکارهای اتلاف دی‌الکتریک و مغناطیسی ضروری می‌سازد. پلیمرهای متداول به دلیل ایجاد مقاومت در برابر شرایط محیطی، امکان ایجاد چسبندگی مناسب بین اجزا و سایر سطوح، ایجاد ساختارهای متخلخل و اسفنجی و امکان توزیع و پخش یکنواخت پرکننده‌ها، بستر و چسب‌های بسیار مناسبی برای توسعه جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی محسوب می‌شوند. پلیمرهای رسانا مانند پلی‌آنیلین و پلی‌پیرول نیز با فراهم کردن مسیرهای رسانای قابل تنظیم، نقش فعالی در افزایش اتلاف دی‌الکتریک ایفا می‌کنند. مرور پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد پلیمرها بسترهای مناسبی برای تهیه کامپوزیت‌های با جذب‌های عمیق‌تر از ۴۰- تا ۷۰- دسی‌بل و پهنای باند جذب موثر بیش از ۱۰ گیگاهرتز در ضخامت‌های بسیار کم هستند. در نتیجه، این مواد گزینه‌هایی ایده‌آل برای کاربردهای پیشرفته در حوزه مخابرات و هوافضا محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی:

جاذب امواج
الکترومغناطیسی،
کامپوزیت‌های پلیمری،
اتلاف دی‌الکتریک،
اتلاف مغناطیسی،
پلیمرهای رسانا.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

Mahmoud.heydari@ihu.ac.ir

۱ مقدمه

گسترش سریع فناوری‌های ارتباطات بی‌سیم، علاقه به موادی با قابلیت کنترل تابش الکترومغناطیسی به‌ویژه در ناحیه مایکروویو (۲-۴۰ گیگاهرتز) را افزایش داده است [۱]. جاذب‌های کارآمد باید امکان نفوذ موج الکترومغناطیسی را فراهم کرده و متعاقباً انرژی را از طریق اتلاف دی‌الکتریک یا مغناطیسی تضعیف کنند. در کنار مفهوم جاذب امواج الکترومغناطیسی، مفهوم محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی (Electromagnetic Interference Shielding) نیز مورد توجه دانشمندان است. هدف از محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی مسدود کردن برای نفوذ یا بازتاب تابش بیشینه است. مواد محافظ در برابر امواج الکترومغناطیسی می‌بایست رسانایی مناسب و نفوذپذیری مغناطیسی پایینی داشته باشند [۲، ۳]. با این حال، جذب امواج الکترومغناطیسی بر تبدیل انرژی تابشی به اتلاف حرارتی در توده ماده تمرکز دارد. پلیمرها به دلیل چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی و عوامل محیطی، انعطاف‌پذیری مکانیکی و سهولت شکل‌دهی از مواد مورد توجه در طراحی جاذب‌ها هستند [۴]. پلیمرها و رزین‌های پلیمری را می‌توان به صورت پوشش، اسفنج یا به صورت ورق و لایه استفاده کرد. با این حال، اکثر پلیمرهای خالص از نظر الکتریکی عایق و از نظر مغناطیسی غیرفعال هستند. بنابراین، استفاده از پرکننده‌ها و افزودنی‌های مناسب عملکردی برای ایجاد رفتار جذب امواج الکترومغناطیسی ضروری است. اخیراً تهیه کامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمر با افت بازتاب بیش از ۴۰- دسی‌بل و پهنای باند جذب مؤثر بیش از ۵ گیگاهرتز را در ضخامت‌های کمتر از ۵ میلی‌متر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵]. در این مقاله مروری در ابتدا به سازوکارهای جذب انرژی الکترومغناطیسی پرداخته شد. در ادامه، بسترهای پلیمری پرکاربرد در این حوزه با تمرکز بر پلیمرهای رسانا بررسی شده و خواص کامپوزیت‌های با کارایی بالا بحث شد. در نهایت پرکننده‌های عمده و اصلی مورد استفاده در کامپوزیت‌های جاذب امواج الکترومغناطیسی برپایه پلیمر بررسی شدند.

"

سازوکار جذب امواج الکترومغناطیسی

هنگام برخورد موج الکترومغناطیسی با ماده جاذب دو شرط برای جذب بالا مورد نیاز است: (۱) تطابق امپدانس سطح ماده با فضای آزاد (هوا): که موجب عدم بازتاب از سطح آن و ورود به درون جاذب می‌شود. (۲) ماده خاصیت اتلاف مغناطیسی یا دی‌الکتریک از خود نشان دهد. در واقع جذب امواج الکترومغناطیسی شامل تبدیل انرژی الکترومغناطیسی

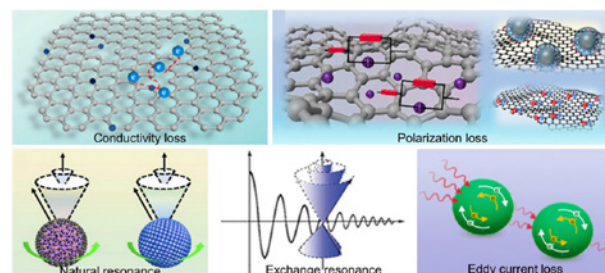
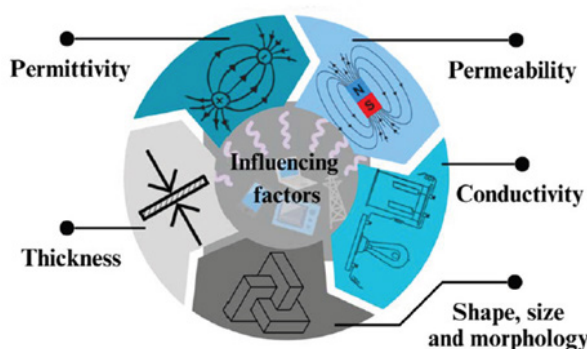
تابشی به گرما از طریق سازوکارهای اتلاف دی‌الکتریک و اتلاف مغناطیسی است. افت بازتاب (Reflection Loss) معمولاً بر حسب دسی‌بل بیان شده و بازده جذب را کمی می‌کند [۶].

$$RL(dB) = -20 \log \left(\frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right) \quad (1)$$

در این معادله Z_0 امپدانس فضای آزاد بوده و Z_{in} برابر است با:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \tanh \left[j \left(\frac{2\pi}{c} \right) \omega d (\mu_r \epsilon_r) \right] \quad (2)$$

متغیرهای ω ، c و d به ترتیب سرعت نور، بسامد و ضخامت جاذب هستند. متغیرهای μ_r و ϵ_r به ترتیب نفوذپذیری مختلط و گذردهی مختلط هستند. متغیرهای μ_r و ϵ_r دارای دو بخش حقیقی (μ' و ϵ') و موهومی (μ'' و ϵ'') هستند. بخش حقیقی نشان‌دهنده امکان ذخیره‌سازی انرژی مغناطیسی و الکتریکی و بخش موهومی نشان‌دهنده امکان اتلاف انرژی مغناطیسی و الکتریکی است [۷]. افت بازتاب کمتر از ۱۰- دسی‌بل نشان دهنده جذب بیش از ۹۰٪ است، افت بازتاب‌های بیشتر همچون ۴۰- دسی‌بل مربوط به میرایی بیش از ۹۹/۹۹٪ امواج الکترومغناطیسی است. اگر ماده‌ای افت بازتاب ۱۰- دسی‌بل و یا کمتر از آن داشته باشد به‌عنوان ماده جاذب مؤثر طبقه‌بندی می‌شود [۸]. اتلاف دی‌الکتریک (Dielectric Loss) $\tan \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$ ناشی از اتلاف رسانایی (Conductive Loss) و آسودگی قطبش (Dipolar Relaxation) است. الکترون‌ها از مسیرها رسانای پیوسته مهاجرت و از مسیرهای ناپیوسته عبور می‌کنند. اتلاف آسودگی قطبش مربوط به الکترون‌ها، یون‌ها، دوقطبی‌ها و بین سطوح است. قطبش الکترونی و یونی در بسامدهای بسیار بالا رخ می‌دهد. بنابراین دو سازوکار آسودگی دوقطبی‌ها و بین سطحی مربوط به بسامدهای پایین (۱۸-۲ GHz) هستند. آسودگی دوقطبی ناشی از اتم‌های مختلف در کنار یکدیگر، نقص‌های ذاتی و گروه‌های عاملی مختلف است. آسودگی بین‌سطحی (Interfacial Relaxation) در مرزهای ناهمگن مواد با خاصیت دی‌الکتریک متفاوت ایجاد می‌شود. اتلاف مغناطیسی ($\tan \delta_\mu = \mu''/\mu'$) (Magnetic Loss) ناشی از اتلاف جریان گردابی (Eddy Current Loss)، اتلاف پسماند مغناطیسی (Magnet-) (ic Hysteresis Loss) و اتلاف باقی‌مانده (Residual Loss) است [۹]. اتلاف پسماند میزان انرژی مورد نیاز برای غلبه بر وادارندگی در طول چرخه‌های مغناطیسی را کمی‌سازی می‌کند. بزرگی این مقدار به‌صورت خطی با وادارندگی ماده تحت میدان‌های الکترومغناطیسی متناسب است. اتلاف جریان



شکل ۱ سازوکارهای اصلی اتلاف دی‌الکتریک و مغناطیسی امواج

الکترومغناطیسی [۱۰].

شکل ۲ متغیرهای تأثیرگذار بر بازده جذب امواج الکترومغناطیسی [۱۱].

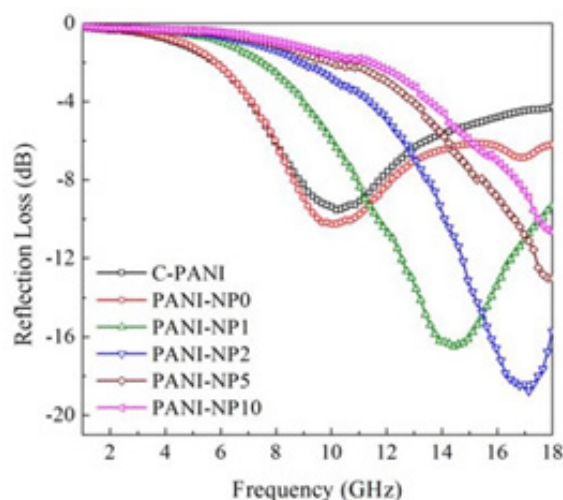
اپوکسی به دلیل خواص مکانیکی مطلوب، چسبندگی عالی، پایداری حرارتی و قابلیت برهم‌کنش مناسب با انواع پرکننده‌ها به‌طور گسترده به‌عنوان زمینه پلیمری استفاده می‌شوند [۱۲]. از رزین اپوکسی می‌توان برای تهیه چسب، پوشش یا قطعات کامپوزیتی ساختاری با قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی استفاده کرد. کامپوزیت‌های اپوکسی با پرکننده‌های گرافن، دوده یا مکسین به دلیل قطبش بین‌سطحی و ایجاد شبکه‌ی رسانا گذردهی مختلط (ϵ' و ϵ'') و بالایی را نشان می‌دهند. زاو و همکاران [۱۳] ساختار ساندویچی با لایه مرکزی رزین اپوکسی دارای ۸۰٪ وزنی از نانوپودر نیکل-آهن و لایه‌های بیرونی الیاف شیشه/رزین اپوکسی و الیاف کربن/رزین اپوکسی تهیه کردند. این ساختار ساندویچی در بسامدهای ۴/۹۳ تا ۵/۷۹ GHz و ۱۴/۹۶ تا ۱۸ GHz دارای جذب موثر بیشتر از ۱۰- دسی‌بل بود. رزین اپوکسی به‌عنوان زمینه و بستر کامپوزیت‌های دارای پلیمرهای رسانا همچون پلی‌آنیلین، ترکیبات کربنی، پرکننده‌های مغناطیسی و ... استفاده شده است [۱۴-۱۶].

پلی‌یورتان‌ها با دارا بودن ساختار قطعه‌های نرم-سخت و امکان انتخاب هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده زنجیر، فرصت طراحی زمینه با مشخصات ویژه را فراهم می‌کنند. برحسب نوع پلی‌ال، عامل پخت و گسترش‌دهنده زنجیر می‌توان بسترهای انعطاف‌پذیر، مقاومت بالا در برابر آب و مقاوم در برابر کهولت تهیه کرد. وانگ و همکاران [۱۷] با استفاده از نانوذرات توخالی Fe_3O_4 و الیاف کربن پوشش‌دار شده با ذرات نقره موفق به تهیه جاذب با افت بازتاب ۷۱/۶- دسی‌بل در ۸/۵ GHz با ضخامت ۱/۶ mm شدند. پلی‌یورتان به‌عنوان زمینه و ماتریس با پلی‌ال پلی‌تترامتیلن‌اترگلیکول (PTMEG) و ایزوفورن دی‌ایزوسیانات (IPDI) به‌عنوان عامل پخت و کومونمر دی‌سولفیدی به‌عنوان گسترش‌دهنده زنجیر امکان خودترمیمی ۵۴٪ کامپوزیت را فراهم کرد. مام و همکاران [۱۸] با استفاده

گردابی از تبدیل انرژی میدان مغناطیسی به انرژی الکتریکی ناشی می‌شود. طی این پدیده، حامل‌های بار از مسیرهای رسانا عبور کرده تا میکروجران‌ها را تحت میدان‌های متناوب الکترومغناطیسی ایجاد شوند. میکروجران‌های القاشده توسط شار مغناطیسی متناوب، انرژی الکترومغناطیسی را به‌طور مؤثر به‌صورت گرما تلف می‌کنند و در نتیجه میزان جذب امواج الکترومغناطیسی فرودی را افزایش می‌دهند. اتلاف باقی‌مانده مربوط به تمامی سازوکارهای اتلاف انرژی به غیر از اتلاف جریان گردابی و تلفات پسماند است. تحت میدان مغناطیسی با بسامد پایین، اتلاف باقی‌مانده عمدتاً به رزونانس ابعادی، رزونانس دیواره دامن و رزونانس طبیعی نسبت داده می‌شود. در ناحیه بسامد مایکروویو، تلفات مغناطیسی در ماده مغناطیسی در درجه اول مربوط به رزونانس طبیعی/تبادلی و تلفات جریان گردابی است. این دو متغیر، معیارهایی برای میزان میرایی امواج الکترومغناطیسی هستند. سازوکارهای اتلاف الکتریکی و مغناطیسی در شکل ۱ نشان داده شد.

جذب‌های مؤثر مستلزم امپدانس (Z_{in}) نزدیک به امپدانس فضای آزاد ($Z_0 \approx 377 \Omega$) است. هنگامی که نسبت ϵ_r/μ_r به‌طور قابل‌توجهی از یک منحرف شود، حتی اگر میزان میرایی بالا باشد، منجر به افزایش بازتاب می‌شود. بنابراین مواد با رسانایی بالا اغلب به‌جای جذب مایکروویو آن را منعکس می‌کنند. هنگامی که ضخامت جاذب ضریب فردی از یک‌چهارم طول موج ($t = \lambda/4n$) ورودی باشد، منجر به افزایش جذب می‌شود. متغیرهای تأثیرگذار بر بازده میزان جذب امواج الکترومغناطیسی در شکل ۲ نشان داده شد.

ماتریس‌های پلیمری برای جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی با در نظر گرفتن عایق بودن ذاتی پلیمرها، رسانایی و اتلاف‌های دی‌الکتریک و مغناطیسی باید از طریق افزودن پرکننده‌ها و آمیزه‌سازی با آن‌ها ایجاد شود. در میان پلیمرها و رزین‌های با قابلیت تشکیل پیوندهای رزین‌های اپوکسی و پلی‌یورتان‌ها به‌عنوان بسترهای گرماسخت موردتوجه هستند. رزین‌های



شکل ۳ مقایسه افت بازتاب پلی آنیلین معمولی (C-PANI) با پلی آنیلین های تهیه شده با روش رها کردن معکوس با زمان [۲۷]

۳/۲ تا ۱۸ GHz شدند. در این روش با کنترل مورفولوژی (تهیه نانوذرات مجزا و جلوگیری از کلوخه شدن) و تغییر ساختار زنجیر پلی آنیلین (کوتاه تر شدن طول مزدوج و افزایش حالت اکسایش) افت بازتاب پلی آنیلین خالص بیشتر از حتی نانوکامپوزیت های پلی آنیلین با پرکننده هایی همچون Fe_3O_4 و $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ شد [۲۸-۳۰]، شکل ۳.

در واقع با کاهش زنجیرهای مزدوج (Conjugated Chains) و افزایش حالت اکسایش (Oxidation States) در زنجیرهای پلی آنیلین رسانایی، بخش واقعی و بخش موهومی گذردمی کاهش یافته و در نتیجه تطابق امپدانس با فضای آزاد تا حدودی افزایش و امکان نفوذ به داخل سطح فراهم شد، شکل ۴.

معمولا از روش پلیمری شدن درجا برای تهیه کامپوزیت های برپایه آنیلین استفاده می شود. ترکیب پلی آنیلین با فریت ها یا نانوساختارهای کربنی، موجب بهبود عملکرد جذب خواهد شد. کامپوزیت های پلی آنیلین-فریت روی با افت بازتاب ۵۲/۸- دسی بل در بسامد ۱۰ GHz توسط رامش و همکاران [۳۱] تهیه شد. نتایج نشان دهنده هم افزایی قابل توجه اتلاف دی الکتریک و مغناطیسی بود و نسبت ترکیب درصد پلی آنیلین و فریت برابر بود. وجود شبکه های پلی آنیلین رسانا موجب بهبود تطبیق امپدانس و ذرات فریت باعث اتلاف رزونانس مغناطیسی شدند. پلی پیرول نیز سازوکار رسانایی مشابه پلی آنیلین داشته و در عین حال فرایندپذیری آن بهتر است. پلی پیرول در چهار اندازه و ساختارهای مختلف تهیه می شود. (۱) نانوذرات صفر بعدی (۲) نانولوله ها و نانوالیاف تک بعدی (۳) نانوصفحات دوبعدی و (۴) هیدروژل های متخلخل سه بعدی. به عبارت روشن تر، تلاش

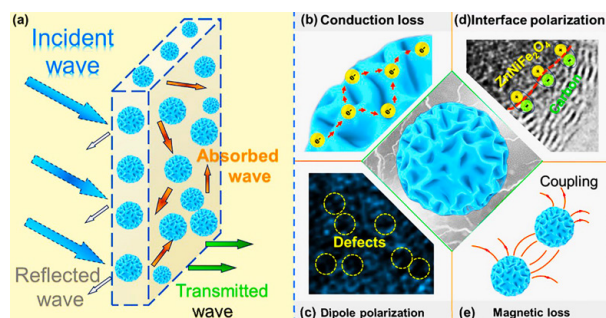
از قابلیت اسفنجی شدن پلی یورتان و بهره برداری از پرکننده های گرافیت و کربونیل آهن موفق به تهیه جاذب امواج رادار با قابلیت کاهش ۸۰٪ سطح مقطع راداری در نواحی X و Ku و ۱۰۰٪ در ناحیه C شدند. کامپوزیت های مبتنی بر پلی یورتان حاوی پرکننده های مغناطیسی یا کربنی می توانند بر روی سطوح منحنی به عنوان پوشش های نامرئی کننده راداری عمل کنند [۲۰، ۱۹]. در واقع بسترهای پلی یورتانی امکان تهیه جاذب های پایه پلیمری نرم و منعطف را فراهم می کند. از بسترهای پلیمری همچون رزین های فنولیک و پلی ایمیدها می توان برای کاربردهای با مقاومت حرارتی بالا استفاده کرد. از رزین های فنولیک به عنوان بستر مناسب با قابلیت کربنی شدن برای تهیه فوم های کربنی با قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی استفاده می شود [۲۱]. پلی ایمیدها پایداری حرارتی بالا) بیشتر از ۳۰۰ درجه سانتی گراد)، مقاومت مناسب در برابر انواع حلال ها و استحکام و خواص مکانیکی مطلوبی داشته و به اشکال چسب، پوشش، الیاف، غشاء و... قابل استفاده هستند [۲۲، ۲۳]. لی و همکاران [۲۴] کامپوزیت های پلی ایمید-گرافن کارایی با پایداری حرارتی ۴۱۵ درجه سانتی گراد و بیشینه افت اتلاف ۷۵/۹- دسی بل تهیه کردند. میزان اکسیدگرافن در این کامپوزیت حدود ۳٪ بود.

جاذب های رسانای پلیمری

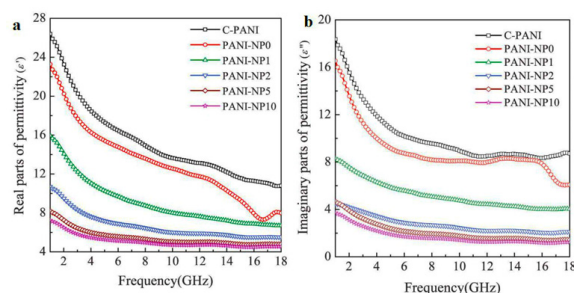
پلی آنیلین (PANI) به دلیل رسانایی قابل تنظیم و پایداری محیطی از جمله پلیمرهای رسانای مورد توجه است [۲۵]. رفتار جذب امواج الکترومغناطیسی پلی آنیلین به ثابت دی الکتریک آن نسبت داده می شود زیرا پلی آنیلین دارای خاصیت مغناطیسی نیست. به عبارت دیگر گذردمی مختلط بالا و نفوذپذیری مختلط پایین منجر به دشواری تطابق امپدانس آن شده و شرط عدم بازتاب سطحی نقض می شود. بنابراین کاربرد آن به منظور استفاده در جاذب ها به صورت خالص محدود است. تهیه کامپوزیت های با پرکننده های مغناطیسی همچون Fe_3O_4 ، $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ و کربونیل های آهن به منظور کاهش گذردمی و افزایش نفوذپذیری منجر به تطابق امپدانس بالاتری خواهد شد. با این وجود، در کامپوزیت های مذکور نیز بخش اعظم سازوکار جذب، اتلاف الکتریکی بوده و اتلاف مغناطیسی سهم کمتری را داراست. سان و همکاران [۲۶] نشان دادند پلی آنیلین تهیه شده با مورفولوژی میله ای، افت بازتاب (۱۴- دسی بل) عمیق تر و پهن تری نسبت به پلی آنیلین تهیه شده با مورفولوژی کروی (۸/۵- دسی بل) داشت. ژانگ و همکاران [۲۷] با استفاده از روش رها کردن معکوس (Reverse Dropping Method) موفق به تهیه پلی آنیلین با افت بازتاب ۴۰/۵- دسی بل در ۵/۸ GHz و پهنای جذب موثر از

تهیه جاذب با افت بازتاب کمینه $56/8\%$ و پهنای باند جذب موثر $4/4$ GHz در ضخامت 5 میلی‌متر شد [۳۴]. کامپوزیت پلی‌پیرول-فریت کبالت افت بازتاب کمتر از 45% دسی‌بل و پهنای باند جذب موثر 6 GHz نشان داد. هسته‌های فریت نقش اتلاف الکترومغناطیسی و پوشش پلی‌پیرول نقش اتلاف دی‌الکتریک دارند. در این ساختار، هسته چین‌وچروکدار موجب افزایش سطح تماس هسته و پوسته و افزایش قطبش بین‌سطحی می‌شود. نقص‌ها و گروه‌های عاملی بر روی پلی‌پیرول موجب دوقطبی شدن، هسته فریتی موجب اتلاف مغناطیسی (اتلاف جریان گردابی، رزونانس طبیعی و تبادلی) و برقراری تعادل میان گذردهی و نفوذپذیری موجب افزایش تطابق امپدانس با محیط می‌شوند، شکل ۶.

با استفاده از پوشش پلی‌پیرول بر روی میکروذرات مگنتیت (Fe_3O_4) کامپوزیت با پهنای باند جذب موثر کل ناحیه Ku تهیه شد. بیشینه افت بازتاب کامپوزیت مذکور معادل $41/9\%$ دسی‌بل در $13/3$ در ضخامت 2 میلی‌متر بود [۳۵]. از نانوذرات مغناطیسی همچون نیکل، آهن و کبالت و آلیاژهای آن‌ها نیز در بهبود خواص جاذبی پلی‌پیرول استفاده شده است. کمینه افت بازتاب در نسبت وزنی $1/4$ نیکل به پلی‌پیرول برابر با $5/5$ GHz مشاهده شده و با کاهش مقدار نسبت نیکل/پلی‌پیرول افت بازتاب نیز کاهش یافت. پهنای باند جذب موثر آن $5/5$ GHz بود [۳۶]. با وجود بالا بودن نرخ جذب امواج الکترومغناطیسی مقاومت در برابر خوردگی آن‌ها پایین است. کامپوزیت پلی‌پیرول با پرکننده‌های صفحه‌ای نیز مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. لی و همکاران [۳۷] با پلیمری کردن درجای پلی‌پیرول در حضور صفحات گرافن موفق به تهیه جاذب با کمینه افت بازتاب 50% دسی‌بل و پهنای باند جذب موثر 5 GHz شدند. آبروزل پلی‌پیرول/اکسیدگرافن کاهش یافته (RGO) با پهنای باند جذب موثر $6/76$ GHz و کمینه افت بازتاب $54/4\%$ دسی‌بل در $12/76$ با تنها 43% وزنی از اکسیدگرافن کاهش یافته (RGO)



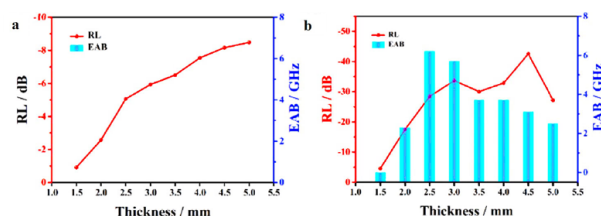
شکل ۶ سازوکارهای اتلاف انرژی الکترومغناطیسی در ساختار هسته-پوسته فریت/پلی‌پیرول [۳۴]



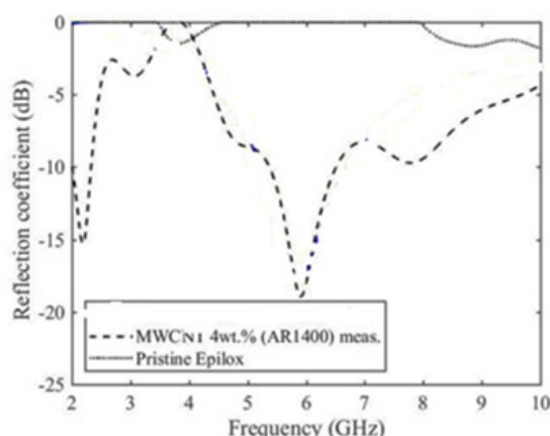
شکل ۴ مقایسه بخش‌های اصلی و موهومی گذردهی پلی‌آنیلین معمولی و پلی‌آنیلین تهیه‌شده با روش رهایش معکوس [۲۷]

برای حرکت از سنتز پلی‌پیرول با ساختار توده‌ای به سوی مورفولوژی‌های ویژه به‌منظور بهبود رفتار جذب از راهبردهای اصلی این حوزه است. مشابه پلی‌آنیلین، مورفولوژی بر روی تطابق امپدانس و میزان میرایی موثر است. زی و همکاران [۳۲] نانولوله‌های توخالی پلی‌پیرول با قطر بیرونی 100 نانومتر و قطر داخلی 60 نانومتر با استفاده از قالب نرم (Soft Template) متیل نارنجی موفق به بهبود افت بازتاب پلی‌پیرول توده‌ای از 7% دسی‌بل به $43/8\%$ دسی‌بل با افزایش پهنای جذب موثر به میزان $6/2$ GHz شدند، شکل ۵. این بهبود به تطابق امپدانس بیشتر، بازتاب‌های داخلی چندگانه و 3 بهبود اتلاف رسانایی و 4 بهبود قطبش بین‌سطحی نسبت داده شد.

یو و همکاران [۳۳] با روش خشک‌کردن انجمادی (Freeze Drying) موفق به تهیه آبروزل پلی‌پیرول با افت بازتاب کمینه 55% دسی‌بل در 14 GHz و پهنای باند جذب موثر $5/5$ GHz در ضخامت دو میلی‌متر شدند. در ساختار آبروزل سه‌بعدی سازوکارهای مطرح‌شده برای بهبود میزان جذب امواج شدت بیشتری می‌یابند. نتایج این پژوهش از نظر پهنای باند جذب موثر و ضخامت جاذب از کامپوزیت‌های دارای پرکننده‌های مغناطیسی نیز بالاتر بود. پوشش پلی‌پیرول بر روی ذرات مغناطیسی منجر به تهیه ساختارهای هسته-پوسته با قابلیت جذب و چگالی سطحی کنترل‌شده شد. پوشش پلی‌پیرول بر روی ذرات چین و چروکدار فریت ($ZnNiFe_2O_4$) منجر به



شکل ۵ (a) مقایسه افت بازتاب و پهنای باند موثر جذب پلی‌پیرول توده‌ای (b) و پلی‌پیرول نانولوله توخالی در ضخامت‌های مختلف [۳۲]



شکل ۷ افت بازتاب رزین اپوکسی خالص و کامپوزیت ۴٪ وزنی آن با نانولوله کربنی با نسبت منظر ۱۴۰۰ و سطح ویژه ۳۰۰ مترمربع بر گرم [۴۲]

بین سطحی بالایی شد. وجود نقص در ساختار نانولوله کربنی موجب تشدید قطبش بین سطحی شد. از طرف دیگر، نسبت منظر و سطح ویژه بالای نانولوله کربنی موجب پراکنش چندگانه و گیرافتادن پرتو داخل جاذب می شود [۴۲]. امروزه از ترکیب نانولوله های کربنی به صورت دوگانه با پرکننده های دیگر در افزایش پهنای جذب و مقدار آن استفاده می شود. در نانوصفات گرافنی نیز سازوکار جذب برپایه اتلاف دی الکتریک است. به سبب حضور نقص در ساختار و گروه های عاملی، گرافن کاهش یافته (RGO) انطباق امپدانس و جذب بالاتری نسبت به گرافیت، گرافن خالص و اکسید گرافن از خود نشان می دهد. اتلاف رسانایی، قطبش دوقطبی، قطبش بین سطحی و پراکنش چندگانه سازوکارهای اتلاف در کامپوزیت های پلیمر/گرافن هستند [۴۳]. استفاده از سایر انواع پرکننده های کربنی اقتصادی همچون انواع دوده نیز به افزایش قابل توجه جذب امواج منجر خواهد شد. سالایانگ و همکاران تأثیر دوده های معمولی همچون N330 و N660 و دوده های رسانا را بر میزان جذب امواج الکترومغناطیسی اسفنج لاستیک طبیعی NR مورد بررسی قرار دادند. نتایج قابل قبول اسفنج دارای ۶۰ phr از دوده رسانا ظاهر شد [۴۴]. فن و همکاران نیز نشان دادند پارچه الیاف کربنی سه بعدی قابلیت افت بازتاب کامپوزیت برپایه رزین اپوکسی در بازه ۱۱ تا ۱۸ GHz نشان داد، شکل ۸. در کامپوزیت الیاف کربن T300 با ۵۰٪ حجمی از الیاف، چنین رفتاری مشاهده نشد [۴۵].

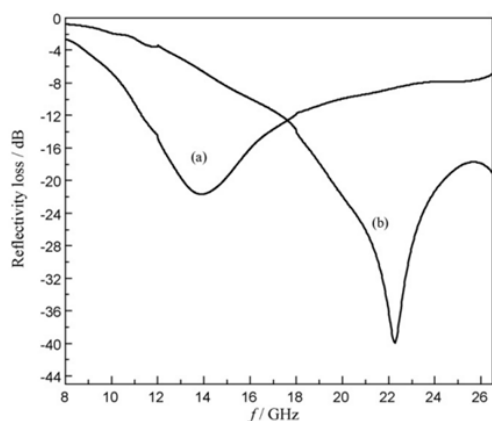
پرکننده های مغناطیسی

پرکننده های مغناطیسی مولفه "μ لازم برای تطابق امپدانس را

توسط وو و همکاران تهیه شد [۳۸]. از طرف دیگر، پلیمری شدن در جای پلی پیرول در کنار نانوصفات مکسین Ti_3C_2Tx منجر به تهیه جاذب با پوشش کامل باند Ku (۱۲-۱۸ GHz) با جذب موثر بیش از ۹۰٪ شد [۳۹]. امروزه تلاش دانشمندان بر روی کامپوزیت های هیبریدی پلی پیرول متمرکز شده است. در این موارد از خواص مغناطیسی پرکننده هایی همچون Fe_3O_4 در کنار خواص دی الکتریکی پلی پیرول و ترکیبات کربنی همچون گرافن و نانولوله های کربنی یا مکسین ها استفاده می شود. پلی تیوفن و مشتقات آن نیز کمتر متداول بوده با این حال در کاربردهای با مقاومت شیمیایی یا حرارتی بالا بیشتر مورد توجه هستند [۴۰]. کامپوزیت این پلیمر با نانوالیاف کربنی و صفات مکسین به منظور بهبود پخش دی الکتریک از طریق تنظیم سطح مشترک گزارش شده است. استفاده از کامپوزیت های پلیمرهای رسانا با ذرات کربنی و فریت همچون کامپوزیت پلی آنیلین/گرافن/فریت منجر به ایجاد سازوکارهای هم زمان رسانایی، قطبش و مغناطیسی خواهد شد. در ادامه به پرکننده های بهبوددهنده رفتار جذب پلیمرها اشاره می شود.

پرکننده های کربنی (نانولوله، گرافن، دوده، الیاف کربن، دوده)

استفاده از نانوساختارهای کربنی با رسانایی الکتریکی کنترل پذیر، نسبت منظر بالا و شیمی سطح قابل تنظیم در جاذب های پایه پلیمری اجتناب ناپذیر است. تنظیم رسانایی از طریق میزان نقص و گروه های عاملی سطح امکان پذیر است. از این رهگذر، تنظیم امپدانس و مقدار میرایی امکان پذیر است. با این حال، مقادیر اضافی از ذرات کربنی و رسانایی بالا منجر به بازتابش به جای جذب امواج خواهد شد. نانولوله های کربنی تک دیواره و چند دیواره با دارا بودن مسیرهای رسانایی یک بعدی و سطح ویژه بسیار بالا (بزرگ تر از ۱۰۰۰ مترمربع به گرم) دارای غلظت همپوشی بسیار پایین (کمتر از ۱٪) هستند. فاقد خاصیت مغناطیسی بودن و دشواری پخش در بسترهای پلیمری دو چالش استفاده از نانولوله ها در تهیه جاذب های امواج الکترومغناطیسی است [۴۱]. این نانولوله ها در بسترهای پلیمری همچون رزین اپوکسی، پلی یورتان و ... شبکه ریزهمپوشی تشکیل می دهند. شبکه مذکور منجر به تسهیل اتلاف رسانایی و قطبش بین سطحی می شود. ساوی و همکاران دریافتند افزودن ۴٪ وزنی از نانولوله های کربنی چند دیواره به رزین اپوکسی موجب مشاهده بیشینه افت بازتاب ۱۷- دسی بل در ۶ GHz شد، شکل ۷. در واقع نسبت منظر و سطح ویژه بالای نانولوله کربنی موجب رسانایی بالا و قطبش

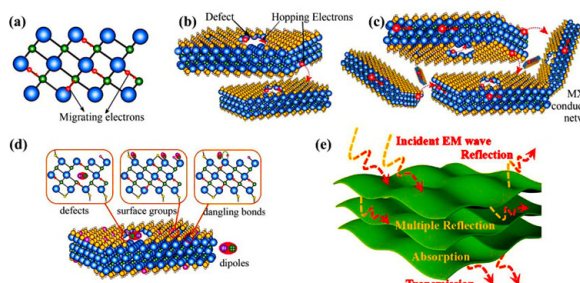


شکل ۹ مقایسه افت بازتاب پلی آنیلین و کامپوزیت فریت $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /پلی آنیلین [۴۸]

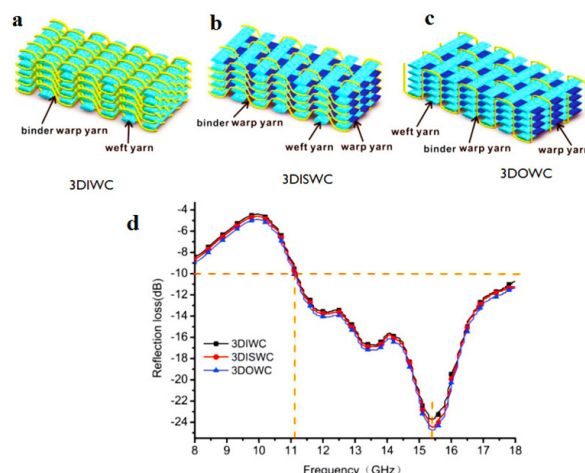
کامپوزیت‌های پلیمری با پرکننده‌های مکسینی

مکسین‌ها مواد با ساختار دوبعدی شبیه به گرافن هستند. مکسین‌ها خانواده‌ای از کربیدها، نیتريد‌ها و کربونیتريد‌های فلزات واسطه بوده و فرمول عمومی آن‌ها را می‌توان به صورت $\text{Mn}+1\text{AXn}$ در نظر گرفت. در فرمول مذکور M فلزات واسطه همچون Ti ، A از عناصر گروه سوم و چهارم و X نیز نشان دهنده نیتروژن یا کربن است. مقادیر n نیز از ۱ تا ۳ است [۴۹]. این ترکیبات با دارا بودن رسانایی فلزی قابل توجه، آب‌دوستی و گروه‌های عاملی انتهایی قابل تغییر انقلاب بزرگی در طراحی جاذب‌ها ایجاد کردند. سطح ویژه بالای آن‌ها قطبش بین سطحی را تقویت کرده و مورفولوژی لایه‌ای موجب بازتاب چندگانه می‌شود. در واقع مهم‌ترین دلیل رفتار جذب امواج الکترومغناطیسی در مکسین‌ها، اتلاف دی‌الکتریک است. سازوکارهای مربوط به این پدیده در شکل ۱۰ نشان داده شد.

وی و همکاران [۵۰] دریافتند کامپوزیت با نسبت وزنی ۲ به ۱ از آنیلین و مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ به روش درجا بیشترین میزان افت



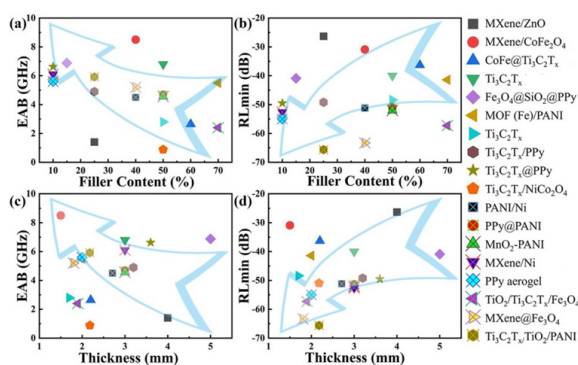
شکل ۱۰ سازوکارهای جذب امواج الکترومغناطیسی توسط نانوصفحات مکسین [۴۹]



شکل ۸ افت بازتاب کامپوزیت سه نوع پارچه سه‌بعدی الیاف کربن/رزمین اپوکسی [۴۵]

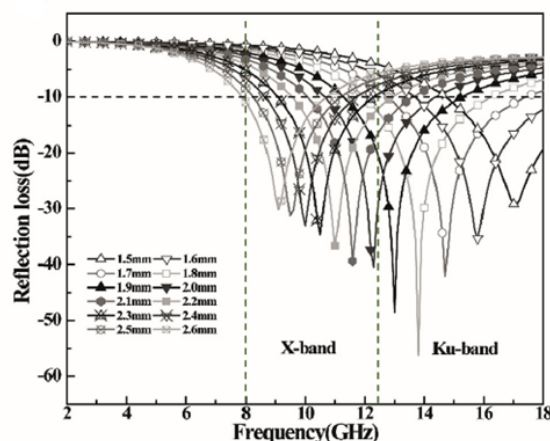
فراهم کرده و با ایجاد سازوکارهایی همچون رزونانس مغناطیسی، رزونانس تبدیلی و اتلاف جریان گردابی، جذب انرژی امواج را امکان‌پذیر می‌سازند. فریت‌ها (با فرمول عمومی MFe_xO_y که در آن M یون فلزاتی همچون کبالت، نیکل، روی، منیزیم یا ترکیب آن‌ها است) مواد سرامیکی به رنگ خاکستری تیره یا سیاه بوده و بسیار سخت و شکننده هستند. این مواد مغناطیسی از اکسیدهایی تشکیل شده‌اند که حاوی یون‌های فریک به‌عنوان ماده اصلی تشکیل‌دهنده هستند (اصطلاح «فریت» از کلمه لاتین «Ferrum» به معنای آهن گرفته شده است). فریت‌های تجاری به سه گروه مجزا تقسیم می‌شوند: (۱) فریت‌های نرم با ساختارهای گارنت، مانند هگرافریت Ba و Sr . هر فریت‌های نرم با ساختارهای اسپینل مکعبی، مانند فریت‌های منیزیم-روی، نیکل-روی و (۳) فریت‌های سخت با ساختارهای مگنتوپلومبیت (شش ضلعی)، مانند هگرافریت Ba و Sr . هر گروه ساختار بلوری خاص خود را دارد [۴۶، ۴۷]. مطالعات گوناگونی پیرامون کامپوزیت‌های فریت/پلیمر به‌منظور جذب امواج الکترومغناطیسی انجام شده است. از بزرگ‌ترین معایب این کامپوزیت‌ها (۱) درصد بالای فریت با چگالی بالا (حدود ۵۰ تا ۸۰٪ وزنی) و (۲) پایین بودن میزان افت بازتاب و پهنای باند جذب موثر است [۴۶]. با این حال کامپوزیت‌های فریت $\text{Co}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /پلی آنیلین (رسانا) حاصل از پلیمری‌شدن درجا منجر به تهیه کامپوزیت با پهنای جذب قابل توجه شد [۴۸، شکل ۹].

ترکیب پرکننده‌های مغناطیسی و دی‌الکتریکی منجر به هم‌افزایی میزان جذب می‌شود.



شکل ۱۲ پهنای باند جذب موثر و بیشینه افت بازتاب برحسب میزان پرکننده و ضخامت برای انواع ترکیبات مکسینی و کامپوزیت آن‌ها با پلیمرهای رسانا [۴۹]

عملکردی مناسب تهیه می‌شود. نقش اصلی ماتریس پلیمری را می‌توان ایجاد پیوندهای یکنواخت برای توزیع پرکننده به صورت یکپارچه، کنترل ریزساختار، تأمین انعطاف‌پذیری در صورت نیاز، محافظت و ممانعت از تأثیر محیط بر روی پرکننده‌های جاذب، ایجاد چسبندگی با سطوح دیگر و یا بستری برای ایجاد حالت اسفنجی در نظر گرفت. بسترهای پلیمری مانند رزین اپوکسی، پلی‌یورتان و پلی‌ایمید با فراهم کردن چسبندگی، پایداری حرارتی و قابلیت شکل‌دهی، امکان ساخت جاذب‌های سخت، انعطاف‌پذیر و یا فومی را فراهم می‌کنند. با این حال، پلیمرهای رسانا همچون پلی‌آنیلین، به‌عنوان فعال دی‌الکتریک نقش مستقیم در اتلاف داشته و با تنظیم مورفولوژی و ریزساختار آن‌ها می‌توان میزان اتلاف و تطابق امپدانس را به صورت مشهودی افزایش داد. کامپوزیت‌های پلیمری امکان ترکیب مزایای پلیمرها با عملکرد نانوپرکننده‌های رسانا و مغناطیسی را فراهم می‌کنند. وقتی پرکننده‌هایی مانند گرافن، نانولوله کربنی، مکسین‌ها، فریت‌ها یا آلیاژهای فلزی در ماتریس پلیمری توزیع می‌شوند، سازوکارهایی نظیر اتلاف رسانایی، قطبش بین‌سطحی، جریان‌های گردابی و رزونانس‌های مغناطیسی فعال شده و به جذب قابل توجه امواج الکترومغناطیسی منجر می‌شوند. هم‌افزایی حاصل از پرکننده‌های با خاصیت دی‌الکتریک و مغناطیسی در بسترهای پلیمری منجر به تهیه کامپوزیت‌های با افت بازتاب بیشینه ۴۰- تا ۷۰- دسی‌بل می‌شود. طراحی سامانه کامپوزیتی چندگانه به‌منظور استفاده از انواع سازوکارهای اتلاف برای افزایش میزان افت بازتاب و پهنای باند جذب موثر در حداقل ضخامت را می‌توان آینده این حوزه تصور کرد.



شکل ۱۱ افت بازتاب کامپوزیت پلی‌آنیلین و مکسین با نسبت وزنی ۲ به ۱ با ضخامت‌های متفاوت [۵۰]

بازتاب ۵۶/۳- در بسامد ۱۳/۸ GHz با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر نشان داد. کامپوزیت مذکور قابلیت جذب در ناحیه X و Ku با ضخامت‌های از بازه ۱/۵ تا ۲/۶ میلی‌متر از خود نشان داد، شکل ۱۱. همان‌طور که پیش از این بیان شد، پلیمرهای رسانا و پرکننده‌های رسانا همچون مکسین‌ها هر یک دارای افت بازتاب قابل توجهی هستند. با این حال، ضخامت بالا و پهنای باند موثر باریک از مشکلات استفاده از آن‌ها است. امروزه تلاش‌های بسیاری برای رفع این معضل با کامپوزیت‌های دوگانه در حال انجام است، شکل ۱۲ [۴۹]. همان‌طور که جهت پیکان‌ها در شکل ۱۲ نشان می‌دهد، هدف تهیه کامپوزیت با حداکثر افت بازتاب، حداقل ضخامت و بیشینه پهنای باند جذب موثر است.

علاوه بر مکسین‌ها، پرکننده‌های دوبعدی دیگری همچون دیکالکونیدهای فلزات واسطه همچون مولیبدن دی‌سولفید MoS_2 و تنگستن دی‌سولفید WS_2 نیز در تهیه کامپوزیت‌های جاذب امواج به کار می‌روند.

نتیجه‌گیری

پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری نقشی محوری در توسعه جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی ایفا می‌کنند. پلیمرها به‌عنوان بسترهای سبک، قابل‌فرایند و از نظر شیمیایی پایدار، امکان طراحی معماری‌های متنوع و مهندسی‌شده را فراهم می‌سازند. عملکرد ذاتی پلیمرها در جذب امواج محدود است، زیرا بیشتر پلیمرها عایق الکتریکی و غیرمغناطیسی هستند. بنابراین رفتار جذب مطلوب تنها با تهیه کامپوزیت‌های دارای پرکننده‌های

مراجع

1. Akinay Y., Gunes U., Çolak B., and Cetin T., Recent Progress of Electromagnetic Wave Absorbers: A Systematic Review and Bibliometric Approach. *ChemPhysMater*, 2, 197-206, **2023**.
2. Shahapurkar K., Gelaw M., Tirth V., Soudagar M. E. M., Shahapurkar P., Mujtaba M., MC K., and Ahmed G. M. S., Comprehensive Review on Polymer Composites as Electromagnetic Interference Shielding Materials. *Polymers and Polymer Composites*, 30, 1-17, **2022**.
3. Wang Y., Zhao W., Tan L., Li Y., Qin L., and Li S., Review of Polymer-Based Composites for Electromagnetic Shielding Application. *Molecules*, 28, 5628, **2023**.
4. Li Z., Chen X., Liu D., Zhou Y., Pan D., and Shin S., Recent Advances in Polymer-Based Composites for Thermal Management and Electromagnetic Wave Absorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8, 210, **2025**.
5. Yan J., Huang Y., Liu X., Zhao X., Li T., Zhao Y., and Liu P., Polypyrrole-Based Composite Materials for Electromagnetic Wave Absorption. *Polymer Reviews*, 61, 646-687, **2021**.
6. Pai A. R., Puthiyaveetil Azeed N., Thankan B., Gopakumar N., Jaroszewski M., Paoloni C., Kalarikkal N., and Thomas S., Recent Progress in Electromagnetic Interference Shielding Performance of Porous Polymer Nanocomposites—a Review. *Energies*, 15, 3901, **2022**.
7. Zhou Y. and Li H., Mwcnt-Reinforced Polymethacrylimide Foams for Broadband Electromagnetic Wave Absorption. *ACS Applied Nano Materials*, 7, 13625-13635, **2024**.
8. Qi X., Xu J., Zhong W., and Du Y., Synthesis of High Purity Chain-Like Carbon Nanospheres in Ultrahigh Yield, and Their Microwave Absorption Properties. *RSC Advances*, 5, 16010-16016, **2015**.
9. Huo J., Wang L., and Yu H., Polymeric Nanocomposites for Electromagnetic Wave Absorption. *Journal of Materials Science*, 44, 3917-3927, **2009**.
10. Zhang Y., Yu H., Wang L., Jian S., Hu H., Zhu Z., Wang Y., Lu Y., and Ouyang C., Research Progress on Conductive Polymer-Based Microwave Absorption Materials: From Materials Design to Functionalities and Applications. *Materials Horizons*, **2025**.
11. Islam R., Sood Y., Mudila H., Ohlan A., and Kumar A., Microwave Absorbing Properties of Polypyrrole-Based 2d Nanocomposites. *Journal of Materials Chemistry A*, 12, 31004-31027, **2024**.
12. Rahman M. M. and Akhtarul Islam M., Application of Epoxy Resins in Building Materials: Progress and Prospects. *Polymer Bulletin*, 79, 1949-1975, **2022**.
13. Zhao H., Zhu Z., Xu Y., Wang Z., and Zhou J., Design and Preparation of an Epoxy Resin Matrix Composite Structure with Broadband Wave-Absorbing Properties. *Results in Physics*, 57, 107353, **2024**.
14. Açıklan E., Çoban K., and Sayintı A., Nanosized Hybrid Electromagnetic Wave Absorbing Coatings. *Progress in Organic Coatings*, 98, 2-5, **2016**.
15. Oyharçabal M., Olinga T., Foulc M.-P., Lacomme S., Gontier E., and Vigneras V., Influence of the Morphology of Polyaniline on the Microwave Absorption Properties of Epoxy Polyaniline Composites. *Composites Science and Technology*, 74, 107-112, **2013**.
16. Belaabed B., Wojkiewicz J. L., Lamouri S., El Kamchi N., and Lasri T., Synthesis and Characterization of Hybrid Conducting Composites Based on Polyaniline/Magnetite Fillers with Improved Microwave Absorption Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 527, 137-144, **2012**.
17. Wang H. and Zhou X., An Electromagnetic Wave Absorbing Material with Self-Healing Function. *Journal of Alloys and Compounds*, 968, 171983, **2023**.
18. Hunjra M., Fakhar M., Naveed K., and Subhani T., Polyurethane Foam-Based Radar Absorbing Sandwich Structures to Evade Detection. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19, 647-658, **2017**.
19. Wang Q., Liu Y., Ma Y., Su E., Su X. J. J. o. A., and Compounds, Preparation and Electromagnetic Property of Ag@Fesial/Polyurethane Resin Flexible Absorption Wave Coating. *Journal of Alloys and Compounds*, 1021, 179666, **2025**.
20. Duan Y., Liu Y., Cui Y., Ma G., and Tongmin W., Graphene to Tune Microwave Absorption Frequencies and Enhance Absorption Properties of Carbonyl Iron/Polyurethane Coating. *Progress in Organic Coatings*, 125, 89-98, **2018**.
21. Li J., Ji H., Li A., Zhang J., Yan Y., Ren L., and Yu H., Carbonized Foams from Graphene/Phenolic Resin Composite Aerogels for Superior Electromagnetic Wave Absorbers. *Ceramics International*, 47, 26082-26091, **2021**.
22. Sezer Hiciyilmaz A. and Celik Bedeloglu A., Applications of Polyimide Coatings: A Review. *SN Applied Sciences*, 3, 363, **2021**.
23. Gouzman I., Grossman E., Verker R., Atar N., Bolker A., and Eliaz N., Advances in Polyimide-Based Materials for

- Space Applications. *Advanced Materials*, 31, 1807738, **2019**.
24. Li J., Huang M., Gao W., Yao K., and Ma H., Graphene/Polyimide Composite Aerogels for Superior Electromagnetic-Wave-Absorbing Materials with High Thermal Stability and Absorption Effectiveness. *ACS Applied Polymer Materials*, 6, 5662-5673, **2024**.
 25. Lin T., Yu H., Wang L., Fahad S., Khan A., Naveed K.-u.-R., Haq F., Nazir A., and Amin B. U., A Review of Recent Advances in the Preparation of Polyaniline-Based Composites and Their Electromagnetic Absorption Properties. *Journal of Materials Science*, 56, 5449-5478, **2021**.
 26. Sun Y., Guo G., Yang B., Zhou X., Cui H., Liu Y., and Zhao G., Synthesis of Polyaniline Microrods with High Microwave Absorption Behaviours. *Micro & Nano Letters*, 5, 313-316, **2010**.
 27. Zhang P., Han X., Kang L., Qiang R., Liu W., and Du Y., Synthesis and Characterization of Polyaniline Nanoparticles with Enhanced Microwave Absorption. *Rsc Advances*, 3, 12694-12701, **2013**.
 28. Yang C., Li H., Xiong D., and Cao Z., Hollow Polyaniline/Fe₃O₄ Microsphere Composites: Preparation, Characterization, and Applications in Microwave Absorption. *Reactive and Functional Polymers*, 69, 137-144, **2009**.
 29. Xu P., Han X., Jiang J., Wang X., Li X., and Wen A., Synthesis and Characterization of Novel Coraloid Polyaniline/BaFe₁₂O₁₉ Nanocomposites. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111, 12603-12608, **2007**.
 30. Chen K., Xiang C., Li L., Qian H., Xiao Q., and Xu F., A Novel Ternary Composite: Fabrication, Performance and Application of Expanded Graphite/Polyaniline/Co Fe₂O₄ Ferrite. *Journal of Materials Chemistry*, 22, 6449-6455, **2012**.
 31. Ramesh T., Sadhana K., and Praveena K., Enhanced Microwave Absorbing Properties of Manganese Zinc Ferrite: Polyaniline Nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34, 1245, **2023**.
 32. Xu D., Zhang M., Wang C., Shen Z., Wang M., Zhang J., Han Z., Li L., Xiong X., and Chen P., Hollow Conductive Polypyrrole Microtubes as Microwave Absorbents with Good Seawater Corrosion Resistance. *Polymer*, 317, 127900, **2025**.
 33. Yu L., Yu L., Dong Y., Zhu Y., Fu Y., and Ni Q., Compressible Polypyrrole Aerogel as a Lightweight and Wideband Electromagnetic Microwave Absorber. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 5598-5608, **2019**.
 34. Wang L., Gao S., Li Z., Shi X., and Qian W., Polymerization Interface Design in Wrinkle Ferrite@ Ppy Core-Shell Composites to Boost the Electromagnetic Wave Absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, **2025**.
 35. Wu Z., Tan D., Tian K., Hu W., Wang J., Su M., and Li L., Facile Preparation of Core-Shell Fe₃O₄@ Polypyrrole Composites with Superior Electromagnetic Wave Absorption Properties. *The Journal of Physical Chemistry C*, 121, 15784-15792, **2017**.
 36. Xu P., Han X., Wang C., Zhou D., Lv Z., Wen A., Wang X., and Zhang B., Synthesis of Electromagnetic Functionalized Nickel/Polypyrrole Core/Shell Composites. *The Journal of Physical Chemistry B*, 112, 10443-10448, **2008**.
 37. Shan L., Chen X., Tian X., Chen J., Zhou Z., Jiang M., Xu X., and Hui D., Fabrication of Polypyrrole/Nano-Exfoliated Graphite Composites by in Situ Intercalation Polymerization and Their Microwave Absorption Properties. *Composites Part B: Engineering*, 73, 181-187, **2015**.
 38. Wu F., Xie A., Sun M., Wang Y., and Wang M., Reduced Graphene Oxide (Rgo) Modified Spongelike Polypyrrole (Ppy) Aerogel for Excellent Electromagnetic Absorption. *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 14358-14369, **2015**.
 39. Lei Y., Ding M., Wu H., Yin D., Li Y., Jiang B., Sun K., Zhang Y., and Du H., A Broadband and Strong Microwave Absorption of Ti₃C₂Tx Mxene/Ppy Composites with a Core-Shell Structure. *Synthetic Metals*, 293, 117254, **2023**.
 40. Kulkarni G., Kandesar P., Velhal N., Phadtare V., Jatratkar A., Shinde S., Kim D.-Y., and Puri V., Exceptional Electromagnetic Interference Shielding and Microwave Absorption Properties of Room Temperature Synthesized Polythiophene Thin Films with Double Negative Characteristics (DNG) in the Ku-Band Region. *Chemical Engineering Journal*, 355, 196-207, **2019**.
 41. Li Q., Zhang Z., Qi L., Liao Q., Kang Z., and Zhang Y., Toward the Application of High Frequency Electromagnetic Wave Absorption by Carbon Nanostructures. *Advanced Science*, 6, 1801057, **2019**.
 42. Savi P., Giorcelli M., and Quaranta S., Multi-Walled Carbon Nanotubes Composites for Microwave Absorbing Applications. *Applied Sciences*, 9, 851, **2019**.
 43. Sutar R. B., Jamadar A. S., Patil S. S., Khandekar R. V., and Yadav J. B., Aniline-Functionalized Rgo/Polyaniline Hybrids: A Synergistic Approach for Enhanced Microwave Absorption. *Diamond and Related Materials*, 112437, **2025**.
 44. Salayong K., Lertwiriaprapa T., Torrungrueng D., Suk-sai S., Pongmuksuwan P., and Kitisatorn W., Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Carbon Black-Filled Natural Rubber Latex. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2444-2448, **2022**.

45. Fan W., Li D.-d., Li J.-l., Li J.-z., Yuan L.-j., Xue L.-l., Sun R.-j., and Meng J.-g., Electromagnetic Properties of Three-Dimensional Woven Carbon Fiber Fabric/Epoxy Composite. *Textile Research Journal*, 88, 2353-2361, **2018**.
46. Houbi A., Aldashevich Z. A., Atassi Y., Telmanovna Z. B., Saule M., and Kubanych K., Microwave Absorbing Properties of Ferrites and Their Composites: A Review. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 529, 167839, **2021**.
47. Elmahaishi M. F., Azis R. a. S., Ismail I., and Muhammad F. D., A Review on Electromagnetic Microwave Absorption Properties: Their Materials and Performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 2188-2220, **2022**.
48. Ma R., Zhao H., and Zhang G., Preparation, Characterization and Microwave Absorption Properties of Polyaniline/Co_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ Nanocomposite. *Materials Research Bulletin*, 45, 1064-1068, **2010**.
49. Dai B., Ma Y., Dong F., Yu J., Ma M., Thabet H. K., El-Bahy S. M., Ibrahim M. M., Huang M., and Seok I., Overview of Mxene and Conducting Polymer Matrix Composites for Electromagnetic Wave Absorption. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5, 704-754, **2022**.
50. Wei H., Dong J., Fang X., Zheng W., Sun Y., Qian Y., Jiang Z., and Huang Y., Ti₃C₂Tx Mxene/Polyaniline (Pani) Sandwich Intercalation Structure Composites Constructed for Microwave Absorption. *Composites Science and Technology*, 169, 52-59, **2019**.