



Original Article

Design and fabrication of a $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ nanocomposite aimed at enhancing microwave absorption efficiency in the X and Ku frequency bands

Mahdieh Dehghani-Dashtabi¹, Hoda Hekmatara¹, Masoud Mohebbi¹

¹Physics Department, Faculty of Basic sciences, Vali-e-Asr Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Received: 2025-10-19

Revised: 2025-10-31

Accepted: 2025-12-18

Abstract: In this study, we examine the design, fabrication, and microwave absorption properties of MoSe_2/MMT and $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ nanocomposites. This innovative approach within the field of nanotechnology holds the potential for the development of novel materials with extensive applications. The nanocomposites were synthesized utilizing a hydrothermal method. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) images reveal the presence of nanosheets and nanorods exhibiting distinct morphologies. Subsequently, we conducted a thorough investigation of the microwave absorption properties of the samples in the X and Ku bands. The results indicate that the MoSe_2/MMT nanocomposite achieves a minimum reflection loss of -28 dB (corresponding to 90% attenuation) over a bandwidth of 2.33 GHz at a thickness of 1.3 mm. In contrast, the $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ nanocomposite, characterized by a ternary structure of 2D/2D/1D, provides multiple interfaces that generate a substantial number of dipoles, facilitating interface polarization that effectively dissipates electromagnetic wave energy. This configuration yields optimal performance at 14.90 GHz with a thickness of 1.4 mm, demonstrating an exceptional reflection loss of -67.02 dB across a bandwidth of 4.78 GHz. The significant reflection loss can be attributed to the synergistic effects of various factors, including layered structures, heterogeneous interfaces, multidimensional architectures, and the introduction of defects, as well as surface polarizations. Our approach aims to fabricate dielectric and conductive nanocomposites, which are positioned as promising lightweight microwave absorber materials with high efficiency due to their combined properties and tunable characteristics.

Keywords: Molybdenum diselenide, microwave absorption, montmorillonite, carbon nanotubes, nanocomposite.

*Corresponding Author. Email: h.hekmatara@vru.ac.ir

How to Cite This Article:

Dehghani-Dashtabi M, Hekmatara H, Mohebbi M. Design and fabrication of a $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ nanocomposite aimed at enhancing microwave absorption efficiency in the X and Ku frequency bands. *Nanomeghyas*. 2025;12(2):199-209. DOI: [10.22034/ns.2025.2061114.1389](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2061114.1389)





طراحی و ساخت نانوکامپوزیت $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ با هدف بهبود کارایی جذب میکروویو در باندهای X و Ku

مهديه دهقانی دشتابی¹، سیده هدی حکمت آرا^{1*}، مسعود محبی¹

۱دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

چکیده: ما در این مطالعه به طراحی، ساخت و خواص جذب میکروویو نانوکامپوزیت های $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ و MoSe_2/MMT خواهیم پرداخت این طراحی نوآورانه در نانوتکنولوژی می تواند به توسعه مواد جدید با کاربردهای گسترده منجر شود این نانوکامپوزیت ها با استفاده از روش هیدروترمال ساخته شدند، تصاویر FESEM نشان دهنده نانوصفحات و نانومپله ها با مورفولوژی خاص است. در ادامه خواص جذب میکروویو نمونه ها در باندهای X و Ku با جزییات بررسی شد و نتایج نشان داد نانوکامپوزیت MoSe_2/MMT مقدار حداقل افت بازتاب ۲۸- دسی بل با پهنای باند ۲٫۳۳ گیگاهرتز در ضخامت ۱٫۹ میلی متر را از خود نشان می دهد، در ادامه نانوکامپوزیت $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ با ساختار سه گانه 1D/2D/3D رابط های متعددی را برای ایجاد تعداد زیادی دوقطبی فراهم می کند و قطبش رابط حاصل برای اتلاف انرژی موج EM مطلوب در فرکانس ۱۴٫۹۰ گیگاهرتز با ضخامت ۱٫۴ میلی متر همراه است همچنین افت بازتاب عالی ۶۷٫۰۲- دسی بل (معادل ۹۰٪ تضعیف) با پهنای باند ۴٫۷۸ گیگاهرتز را از خود نشان داد، افت انعکاس چشمگیر نتیجه هم افزایی اثرات عوامل مختلف مانند ساختارهای لایه ای، رابط های ناهمگن، ساختارهای چند بعدی و ایجاد نقص همچنین قطبش های سطحی است استراتژی ما ساخت نانوکامپوزیت های مبتنی بر نیم رسانا، دی الکتریک و رسانا است، به دلیل ترکیب خواص مختلف و قابلیت تنظیم آن به عنوان مواد امیدوارکننده جاذب میکروویو سبک وزن با کارایی بالا معرفی می گردد.

واژگان کلیدی: دی سلنید مولیبدن، جذب میکروویو، مونت موریلونیت، نانولوله های کربنی، نانوکامپوزیت.

* نویسنده مسئول. ایمیل: h.hekmataara@vru.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

دهقانی دشتابی مهديه، حکمت آرا سیده هدی، محبی مسعود. طراحی و ساخت نانوکامپوزیت $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ با هدف بهبود کارایی جذب میکروویو در باندهای X و Ku. *نانو مقیاس*، ۲۰۲۵، ۱۲(۲)، ۱۹۹-۲۰۹.

DOI: [10.22034/ns.2025.2061114.1389](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2061114.1389)



۱- مقدمه

پیشرفت جوامع اطلاعاتی با توجه به توسعه سریع فناوری بی‌سیم، سیستم‌های رادار، کاربردهای پزشکی، به استفاده گسترده از تجهیزات الکترونیکی وابسته است، این دستگاه‌ها علاوه بر تسهیل انتقال اطلاعات، منجر به تولید تشعشعات الکترومغناطیسی (EM) می‌شوند که اثرات منفی قابل توجهی در زمینه‌های دفاع نظامی، ایمنی اطلاعات و سلامت بیولوژیکی دارند، به همین دلیل، توسعه و استفاده از مواد جاذب میکروویو به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش این آلودگی‌ها اهمیت یافته است. این مواد با جذب تشعشعات الکترومغناطیسی و تبدیل آنها به گرما، می‌توانند به حفاظت از سلامت عمومی و بهبود ایمنی در سیستم‌های اطلاعاتی و تجهیزات الکترونیکی کمک کنند [۱-۲]. انواع مختلفی از مواد جاذب موج الکترومغناطیسی وجود دارد بسته به نوع اتلاف می‌توان آنها را به طور کلی به مواد کربنی [۳]، مواد مغناطیسی [۴]، مواد دی‌الکتریک [۵]، مواد نیم رسانا و رسانا [۶] تقسیم بندی کرد. مواد مغناطیسی به تنهایی با توجه به ثابت دی‌الکتریک پایین و اکسید شدن سریع توجه کمتری را به خود جلب می‌کنند اما مواد نیم رسانا از جمله دی‌سلنید مولیبدن (MoSe_2) که به عنوان یک دی‌کالکوژنید فلز واسطه دوعدی (TMDs) در گروه III - V شناخته می‌شود، به دلیل ساختار لایه‌ای خاص خود، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این ساختار شامل لایه‌های متوالی از اتم‌های مولیبدن و سلنیم است که درون هر لایه پیوندهای کوالانسی قوی و بین لایه‌ها نیروهای ضعیف و اندروالس وجود دارد، این ویژگی‌ها باعث می‌شود که MoSe_2 از نظر فیزیکی مشابه گرافن باشد، تحرک الکترون‌ها در این ماده به واسطه برهمکنش‌های الکترونیکی به راحتی انجام می‌شود و منجر به ایجاد ویژگی‌های الکترونیکی و نوری منحصر به فرد می‌گردد. از دیگر خصوصیات بارز MoSe_2 می‌توان به سطح ویژه بالا، باند انرژی غیرمستقیم و تعداد زیاد سایت‌های فعال اشاره

کرد، این ویژگی‌ها، MoSe_2 را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی چون فوتوکاتالیستی، سلول‌های خورشیدی، ابرخازن و جذب میکروویو تبدیل کرده است، همچنین به دلیل پهنای باند کمتر و رسانایی ذاتی بالاتر نسبت به MoS_2 ، جریان پراکنده‌تری ایجاد می‌کند و میکروویوهای الکترومغناطیسی را مؤثرتر مصرف می‌کند. کاهش تجمع MoSe_2 در مقیاس نانو برای بهبود پراکندگی و انعکاس چندگانه یک چالش است [۷-۸]. ترکیب دی‌سلنید مولیبدن با مواد کربنی می‌تواند به طور قابل توجهی چالش‌های مرتبط با تجمع ورقه‌های آن را کاهش دهد. برای مثال نانولوله‌های کربنی به عنوان جاذب‌های مؤثر در کاهش دی‌الکتریک شناخته می‌شوند، اما ویژگی نفوذپذیری نسبتاً پایین آن‌ها می‌تواند دامنه کاربرد این مواد را در جذب امواج الکترومغناطیسی محدود سازد. از این رو، نانو کامپوزیت‌هایی که از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با آلیاژهای نیم رسانا تشکیل شده‌اند، به دلیل داشتن مقادیر بالای دی‌الکتریک- و افزایش رابط به‌طور طبیعی قابلیت بالایی برای عمل به عنوان جاذب‌های امواج با پهنای باند وسیع و جذب مؤثر دارند. این ویژگی‌ها می‌تواند به توسعه کاربردهای جدید در حوزه فناوری‌های الکترومغناطیسی و ارتباطات کمک شایانی نماید [۹-۱۰].

در پژوهشی فو و همکاران نانوصفحات MoSe_2 را به شکل عمودی بر روی نسبت‌های مختلف از اکسید گرافن قرار دادند پلاریزاسیون و افت رسانایی می‌توانند به‌طور دقیق با کاشت عمودی نانوصفحات MoSe_2 بر روی نسبت‌های مختلف از صفحه‌های RGO تنظیم شوند این کار در سه باند S، X_۲ و Ku بررسی شد مقدار حداقل افت بازتاب ۵۶٫۹- دسی‌بل با پهنای باند ۴٫۱۲ گیگاهرتز بدست آمد، قابلیت تضعیف میکروویو فوق‌العاده به اثر هم‌افزایی ناشی از افت رسانایی و تطابق امپدانس عالی در این کامپوزیت‌ها نسبت داده شد [۶]. اخیراً خواص جذب میکروویو نانو کامپوزیت MMT/Fe₃O₄/PPy بررسی شد و نتایج نشان داد ساختار لایه‌ای با منافذ ورق مانند

آنها سطح ویژه بزرگتر و دوقطبیهای زیادتر با توزیع گسترده تر ایجاد می‌کند نقص‌های فراوان بر روی این صفحات باعث پلاریزاسیون چندگانه می‌شود، فاز مخلوط نیم رسانا-رسانا-دی الکتریک توانایی انتقال الکترون را بهینه می‌کند و تطابق امپدانس را تنظیم می‌کند بهبود خواص الکترومغناطیسی از طریق هم‌افزایی، ویژگی‌های نیمه‌هادی MoSe_2 ، خاصیت دی‌الکتریک پایدار MMT و رسانایی و قطبش بالای MWCNT به صورت هم‌افزا عمل کرده و منجر به بهبود قابل توجه کارایی جذب امواج شده است. پوشش‌دهی پهنای باند وسیع تر X و Ku در ضخامت نازک ۱٫۴ میلی متر برخلاف بسیاری از پژوهش‌های مشابه که تنها بر یک باند متمرکز بوده‌اند، در این کار هر دو باند X و Ku پوشش داده شده و همین امر کاربردپذیری عملی نانوکامپوزیت را در زمینه‌های مخابرات و رادار افزایش می‌دهد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد آزمایشگاهی:

خاک رس مونت موریلونیت سدیمی - سدیم مولیدات دی هیدرات $(\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$ - پودر سلنیوم (Se) - سدیم بروهیدرات (NaBH_4) - اتانول $(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$ - آب دیونیزه

۲-۲- روش ساخت MoSe_2

ابتدا سدیم مولیدات دی هیدرات به همراه پودر سلنیوم با نسبت ۲:۱ و مقدار ۰/۰۷ / گرم سدیم بروهیدرات به عنوان عامل کاهنده در ۵۰ میلی لیتر آب دیونیزه ترکیب شد در این مرحله یک محلول سیاه رنگ مشاهده شد و به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزن مغناطیسی هم زده شد سپس به مدت ۴۵ دقیقه در حمام آلتراسونیک قرار گرفت محلول نهایی با $\text{PH}=9$ به اتوکلاو منتقل و به مدت ۲۴ ساعت با دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. پس از گذشت این مدت زمان، محلول شستشو داده شد و در دمای اتاق خشک گردید.

مونت موریلونیت نه تنها به کاهش چگالی مواد کمک می‌کند، بلکه سطوح متعددی را برای انعکاس و پراکندگی امواج الکترومغناطیسی ایجاد می‌نماید. این ویژگی‌ها به بهبود عملکرد جذب امواج در این مواد منجر می‌شود بطوریکه حداقل افت بازتاب ۴۱٫۳۵- در فرکانس ۱۱٫۵۲ گیگاهرتز با پهنای باند ۸٫۹۲ گیگاهرتز در ضخامت ۳٫۵ میلی متر بدست آمد [۱۱]. همچنین دو نانوساختار تمام کربنی سلسله‌مراتبی (FCNS) مبتنی بر گرافن و MWCNT با روش‌های ساده سنتز شدند. به دلیل اتلاف دی‌الکتریک قوی، -FCNS MWCNT جذب ۵۸- دسیبل در ضخامت ۲٫۶ میلی متر و FCNS گرافن ۵۴- دسیبل در ضخامت ۱٫۲ میلی متر با پهنای باند مؤثر ۳٫۴ گیگاهرتز نشان دادند. این ساختارها جاذب‌های میکروویو فوق نازک و کارآمدی هستند [12]. استراتژی ما ساخت کامپوزیتی جدید است که تقریباً تمامی خواص منحصر بفرد محافظ تداخل الکترومغناطیسی ایده ال را فراهم کرده است در اینجا، یک رویکرد نوین برای اصلاح MoSe_2/MMT ارائه می‌دهیم که بر ظرفیت بالای تبادل یونی و افزایش سطوح ویژه تأکید دارد در این تحقیق نانوکامپوزیت‌های MoSe_2/MMT و $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ به روش هیروترمال سنتز شدند راندمان جذب میکروویو نانوکامپوزیت‌ها در باند X و Ku بررسی شد، نانولوله‌های با ویژگی‌های الکترونیکی برجسته به طور موثری در میدان الکتریکی پاسخ می‌دهد و دی سلنید مولیدن نیز به عنوان یک نیمه‌هادی دو بعدی و گاف انرژی مناسب دارای بارهای منفی غالب روی سطح خود هستند در جایی که این نانوصفات تجمع کنند حفره‌هایی ایجاد می‌شود که بعنوان بار مثبت عمل می‌کنند که منجر به ایجاد دو قطبی‌های سطحی می‌شوند همچنین بارهای منفی بر روی سطح لایه‌های MMT وجود دارند و در فضای بین لایه‌های جذب کاتیون‌های مثبت می‌شوند و موجب تشکیل دو قطبی‌ها می‌شوند در MMT قطبش دی‌الکتریک به دلیل ساختار لایه‌ای، دوقطبی‌های موقتی را در حضور میدان‌های الکتریکی فراهم می‌کند تعامل

۳-۲- روش ساخت MoSe₂/MMT/MWCNT

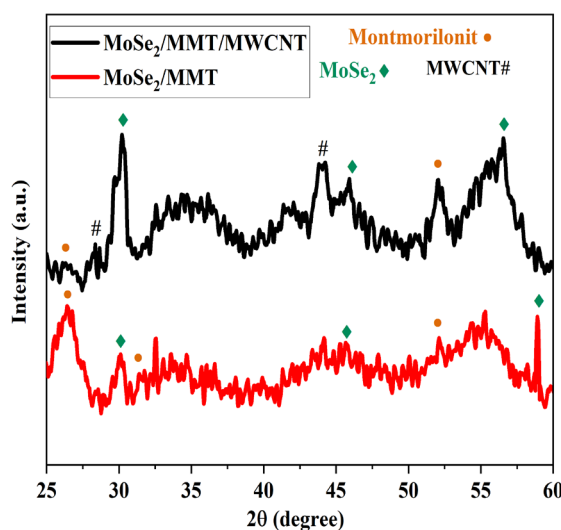
ابتدا مقدار ۰/۹ گرم از نانوصفحات MoSe₂ با ۰/۳ گرم از نانوصفحات مونت موریلونیت مخلوط شد و در ۵۰ میلیلیتر آب دیونیزه با همزن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت هم زده شد. پس از آن ۰/۲ گرم نانولوله کربنی چند دیواره به صورت جداگانه در ۵۰ میلی لیتر آب/اتانول با نسبت ۱:۱ مخلوط شد و به مدت ۳۰ دقیقه تحت حمام آلتراسونیک قرار گرفت و به صورت قطره قطره به محلول اولیه اضافه شد و محلول نهایی به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط با همزن مغناطیسی هم زده شد و سپس در آن با دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک گردید .

۳- نتایج، تحلیل و ارزیابی داده ها

شکل ۱. نتایج بررسی الگوی پراش پرتو ایکس نمونه های MoSe₂/MMT/ و MoSe₂/MMT/MWCNT را نشان می دهد در الگوی MoSe₂/MMT پیک های پراش ۴۵/۶۸، ۳۰/۰۶ و ۵۸/۹۰ مربوط به صفحات و (۱۰۲)، (۰۰۶) و (۱۱۰) از نانوصفحات شش ضلعی MoSe₂ 2H- مطابق با شماره کارت: JCPDS) ۲۹-۰۹۱۴) نشان داده شد تغییر در شدت پیک ها بدلیل تغییر فاصله بین لایه ای است و پیک های پراش

کاملا مشخص خلوص بالای ماده به دست آمده را نشان می دهد [۱۳]. و پیک های پراش مونت موریلونیت در زوایای ۳۱/۳۲، ۳۳/۲۶ و ۵۲/۰۲ مطابق با شماره کارت JCPDF: ۱۳-۰۱۳۵) است فاصله بین لایه های مونت موریلونیت با استفاده از قانون براگ ۱/۲۵ نانومتر بدست آمد [۱۴].

مورفولوژی و سایز تقریبی نانوکامپوزیت ها با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی FESEM که در شکل ۲ نشان داده شد در شکل (a) نانوصفحات دی سلنید مولیبدن و مونت موریلونیت به شکل پوسته پوسته و لایه لایه ای به هم پیوسته قرار گرفتند وقتی که MoSe₂ و مونت موریلونیت با هم ترکیب می شوند، می توانند تعاملات جالبی ایجاد کنند. صفحات MoSe₂ در میان صفحات مونت موریلونیت به صورت نامنظم و متراکم قرار می گیرند که این می تواند به دلیل خاصیت چسبندگی مونت موریلونیت باشد در ادامه در شکل (b) صفحات به هم چسبیده MoSe₂/MMT بر روی نانولوله های کربنی به صورت ساختارهای نازک و کشیده با قطر نانومتری به نمایش درآمدند. این نانولوله ها معمولاً به صورت انبوه یا خوشه ای دیده می شوند در تصویر می توان دید که نانولوله ها به صورت تقریباً یکنواخت توزیع شده اند، ذرات مونت موریلونیت می توانند در نقاط مختلف بر روی



شکل ۱ الگوی XRD نانوکامپوزیت های MoSe₂/MMT/MWCNT و MoSe₂/MMT

برحسب در این مطالعه، از یک مجموعه داده شامل ترکیبات BPH استفاده شد که ویژگی‌های مولکولی و مشخصه‌های مربوط به انرژی این ترکیبات را ارائه می‌دهد. این مجموعه داده از منبعی علمی و معتبر به دست آمده و پس از مکاتبه با نویسنده اصلی مقاله مربوطه در دسترس قرار گرفت [۱۶].

فرکانس در بازه ی 8 تا 18 گیگاهرتز با ضخامت های (1/3 تا 2 میلی متر) اندازه گیری شد.

به منظور محاسبه پارامترهای EM نمونه‌ها، هر نمونه به طور همگن در پارافین جامد با نسبت وزنی 30% پراکنده و به صورت فلنچ‌های موجبر مکعبی X و Ku فشرده شد. پارامترهای EM با استفاده از کیت کالیبراسیون Agilent WR-90 اندازه‌گیری شدند.

این محاسبات با توجه به تئوری خطوط انتقال و بر اساس نفوذپذیری پیچیده نسبی (μ_r) و گذردهی پیچیده نسبی (ϵ_r) انجام شده و از روابط زیر استخراج گردیده است.

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

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

در این روابط، Z_0 به امپدانس محیط خلا اشاره دارد، در حالی که Z_{in} نمایانگر امپدانس ورودی ماده جاذب است. متغیر f نشان‌دهنده فرکانس، C سرعت انتشار موج الکترومغناطیسی در خلا و d ضخامت ماده جاذب را مشخص می‌کند. علاوه بر این، Z به‌عنوان واحد موهومی در این معادلات در نظر گرفته می‌شود. پهنای باند جذب مؤثر (EAB) به‌عنوان یک پارامتر اساسی در ارزیابی قابلیت جذب میکروویو توسط نمونه‌های مختلف شناخته می‌شود. این پارامتر به محدوده فرکانسی اشاره دارد که در آن مقادیر تلفات انعکاسی (RL) کمتر از -۱۰ دسی بل است. به‌طور خاص، زمانی که RL به کمتر از -۱۰ دسی بل برسد، این وضعیت نشان‌دهنده این است که نمونه قادر است بیش از ۹۰ درصد از امواج الکترومغناطیسی

نانولوله‌ها توزیع شوند و ممکن است به نانولوله‌ها بچسبند یا در بین نانولوله‌ها قرار بگیرند تصویر EDS شکل (a') حضور عناصر مولیبدن و سلنید از دی سلنید مولیبدن و تصویر (b') علاوه بر این دو عنصر عناصر سدیم، سلیسیم، منیزیم، آلومینیوم و کربن را تایید می‌کند [۱۵].

۲-۳ پارامترهای الکترومغناطیسی و خواص جذب EM

هنگامی که موج الکترومغناطیسی به یک ماده برخورد می‌کند، بخشی از آن بازتاب می‌شود، قسمتی درون ماده نفوذ کرده و بخشی دیگر از آن عبور می‌کند. در این تعامل پارامترهای کلیدی مانند گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی تاثیر قابل توجهی بر نحوه جذب و انتقال انرژی موج دارند گذردهی مختلط ($\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$) و نفوذپذیری مختلط ($\mu = \mu' + i\mu''$) نانو کامپوزیت های تولید شده، نشان دهنده ویژگی های وابسته به فرکانس است که تاثیر قابل توجهی بر رفتار الکترومغناطیسی این مواد دارد. این پارامترها می‌توانند در محدوده های فرکانسی مختلف تغییر کنند. قسمت های حقیقی ذخیره انرژی الکتریکی و مغناطیسی را نشان می‌دهند که این نشان دهنده درجه قطبش پذیری مواد جاذب است، در حالی که قسمت های موهومی متناظر با ظرفیت اتلاف انرژی الکترومغناطیسی است از آنجایی که هر دو جزء تشکیل دهنده این کامپوزیت‌ها غیرمغناطیسی هستند، نفوذپذیری نسبی به توانایی یک ماده در هدایت میدان‌های مغناطیسی اشاره دارد. با توجه به غیرمغناطیسی بودن اجزاء مورد بحث، این ویژگی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کامپوزیت‌ها نخواهد داشت. بنابراین، تمرکز بر خواص دی‌الکتریک و تأثیر آن‌ها بر عملکرد کلی کامپوزیت‌ها می‌تواند بینش‌های بهتری در زمینه استفاده از این مواد ارائه دهد، مواد محافظ الکترومغناطیسی باید ویژگی‌های خاصی را دارا باشند، از جمله سبک بودن، نازکی و قابلیت جذب در پهنای باند وسیع به این منظور میزان اتلاف بازتاب (RL) نمونه‌های تهیه شده

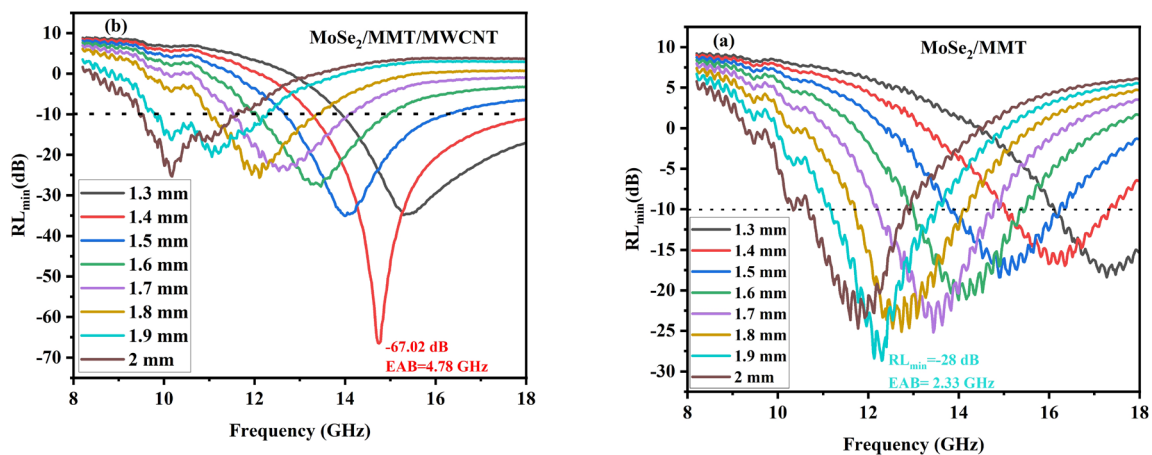
اتلاف دی الکتریک و ایجاد رابط های متعدد دانست [۱۹-۲۰].

پارامترهای الکترومغناطیسی (EM) نقش مهمی در تعیین خواص جذب مایکروویو دارند. بر اساس نظریه دیای، این خواص تحت تأثیر پارامترهای الکترومغناطیسی، شامل گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی قرار دارند

همان طور که در شکل (a) ۴ مشاهده می شود در محدوده فرکانسی ۱۸-۸ گیگاهرتز مقدار ϵ' برای نانوکامپوزیت MoSe₂/MMT روند تقریباً ثابتی داشته بطوریکه ابتدا با نوسانات کوچکی در ناحیه باند x با مقدار ۱۰٫۱۷ به اوج خود در باند ku با مقدار ۱۵٫۹۶ می رسد سپس روند نزولی داشته و به مقدار ۱۰٫۹۸ می رسد که به دلیل قطبش های زیادی مانند قطبش یونی، الکترونیکی، نقص ها و قطبش بین سطحی است. همچنین برای نمونه ی قطبش بین سطحی MoSe₂/MMT/MWCNT مقدار ϵ' روند افزایشی داشته و از مقدار ۱۰٫۲۰ به ۱۲٫۸۵ می رسد نوسانات در باند x ناشی از رزونانس طبیعی است، رسانایی عالی MWCNT و ایجاد پلاریزاسیون سطحی بین دو صفحه منجر به تجمع بار در نواحی رابط می گردد همچنین قطبش الکترونیکی به دلیل پاسخ سریع تر الکترون ها به میدان الکتریکی و کاهش تأثیر قطبش های دیگر افزایش می یابد در شکل (b) مقدار ϵ'' برای نانوکامپوزیت MoSe₂/MMT

ورودی را جذب کند. این ویژگی به ویژه در طراحی و بهینه سازی مواد جذب کننده مایکروویو از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا قابلیت جذب بالا می تواند عملکرد سیستم های مختلفی را که به جذب مایکروویو وابسته هستند، بهبود بخشد. به علاوه، درک و تحلیل دقیق این پارامترها می تواند به توسعه مواد جدید و بهینه سازی ساختارهای جاذب کمک کند و در نهایت به افزایش کارایی و عملکرد سیستم های الکترونیکی و مخابراتی منجر شود [۱۶-۱۸].

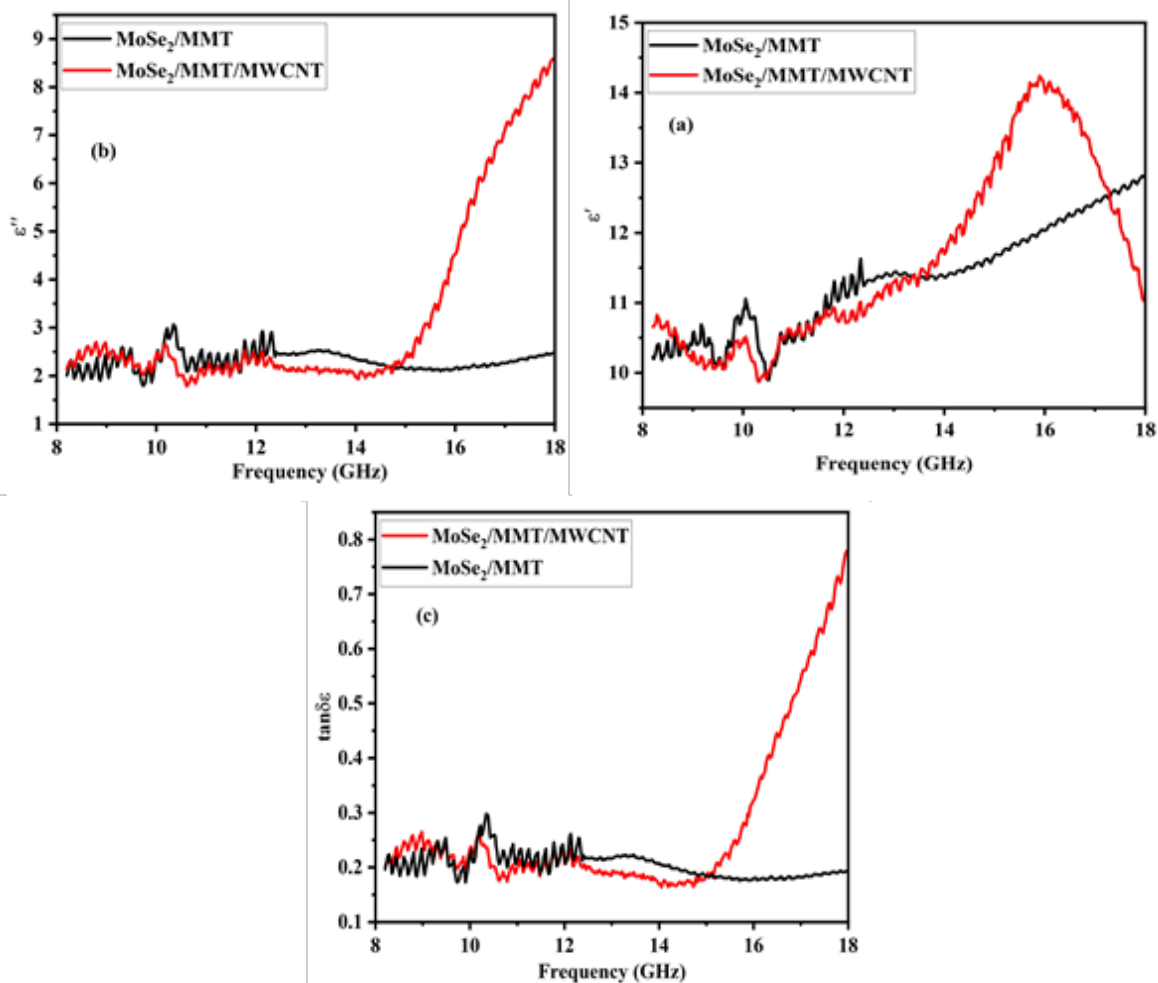
شکل ۳(a) نمودار افت بازتاب بر حسب فرکانس نمونه MoSe₂/MMT دارای مقدار حداقل افت بازتاب ۲۸- دسی بل زیر ۱۰- دسی بل است که نشان دهنده ۹۰ درصد جذب می باشد همچنین پهنای باند آن ۲٫۳۳ گیگاهرتز در فرکانس ۱۲٫۳۰ گیگاهرتز با ضخامت ۱/۹ میلی متر بدست آمد که به دلیل گروه های عاملی، قطبش های سطحی و بین لایه ای گسترده از مونت موریلونیت و همچنین، قطبش های سطحی و نقص ها در MoSe₂ نیم رسانا است. این نانوکامپوزیت در ترکیب با MWCNT مطابق شکل (b) منجر به افت بازتاب عالی ۶۷٫۰۲- دسی بل با پهنای باند ۴٫۷۸ گیگاهرتز در فرکانس ۱۴٫۹۰ گیگاهرتز با ضخامت ۱٫۴ میلی متر شد که این افزایش را می توان به دلیل رسانایی عالی کربن نانوتیوب و مورفولوژی هندسی خاص آن دانست که منجر به افزایش سطح و قطبش های سطحی و بین لایه ای،



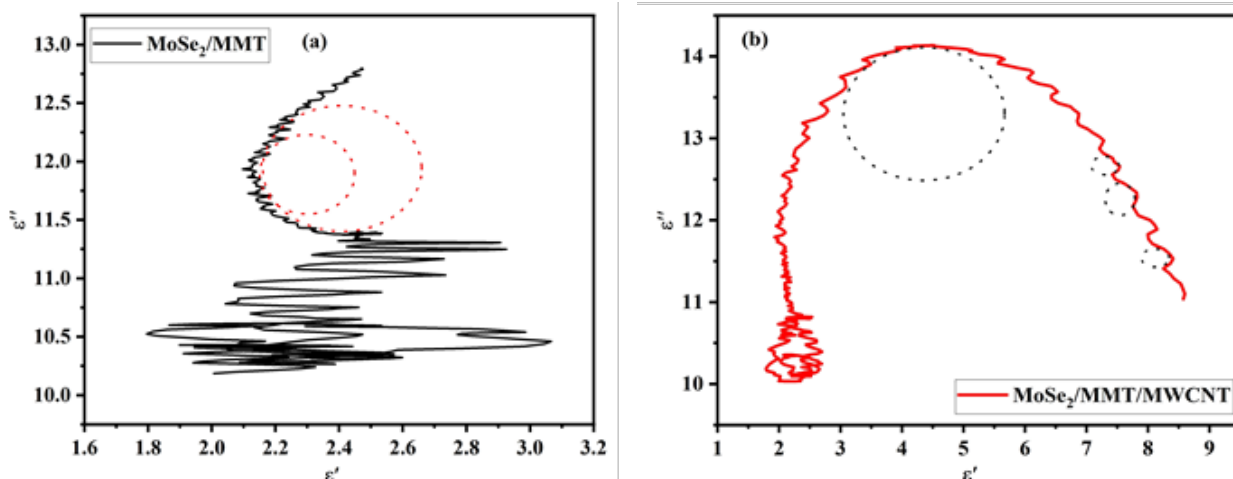
شکل ۳ نمودار افت بازتاب بر حسب فرکانس برای نمونه های MoSe₂/MMT (a) و MoSe₂/MMT/MWCNT (b)

تلفات دی‌الکتریک بروز می‌کند. در شکل (c) تانژانت اتلاف دی‌الکتریک ($\tan\delta\epsilon = \epsilon''/\epsilon'$) محاسبه شد. در شکل مشخص است که نمونه MoSe_2/MMT دارای مقدار کم 0.19 است به دلیل وجود آرامش‌های قطبش متعدد، چندین پیک تشدید در باند x از خود نشان می‌دهد این نتیجه نشان دهنده سهم اصلی انواع مختلف آرامش‌های قطبش مانند قطبش یونی، الکترونیکی، نقص‌ها، قطبش سطحی و دوقطبی است. در نمونه $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ دلیل حضور MWCNT اتلاف رسانایی بالایی وجود دارد، انتقال بار در شبکه MWCNT به صورت مهاجرت و جهش الکترون رخ می‌دهد، هنگامی که موج EM در MWCNT منتشر می‌شود، الکترون‌های موجود در شبکه MWCNT در یک لوله منفرد منتقل می‌شوند

1.98 به 2.48 افزایش یافت و این بدلیل وجود ذرات لایه‌ای آنیزوتروپیک چندجزئی مونت‌موریلونیت با قابلیت قطبش بالا مربوط می‌شود که به طور قابل توجهی باعث افزایش ثابت دی‌الکتریک موهومی کامپوزیت می‌گردد همچنین برای نمونه $\text{MoSe}_2/\text{MMT}/\text{MWCNT}$ روند افزایشی از $2/18$ به $8/58$ رسیده که با مقدار ϵ' مطابقت دارد که نشان دهنده این است که هدایت بر قطبش غلبه می‌کند و تاثیر آن بیشتر از تاثیر قطبش بر رفتار الکتریکی ماده است. به منظور ارزیابی جامع‌تر تلفات دی‌الکتریک، تانژانت تلفات دی‌الکتریک نمونه‌ها در محدوده فرکانسی $8-18$ گیگاهرتز در شکل (c) محاسبه شد به‌طور کلی، افزایش مقدار $\tan\delta$ به معنای اتلاف بیشتر انرژی از میکروویو ورودی است، که به شکل



شکل ۴. پارامترهای الکتریکی، بخش‌های حقیقی، موهومی گذردهی الکتریکی (a,b) و تانژانت دی‌الکتریک (c)



شکل ۵ نیم دایره‌های کول-کول برای نمونه‌های MoSe₂/MMT(a) و MoSe₂/MMT/MWCNT(b)

که به شدت در مکان‌های نقص MWCNT القا می‌شوند در این نمونه، اتلاف رسانایی بر قطبش ریلکسیشن غالب است. این پدیده ممکن است در ارتباط با عیوب و نقص‌ها و همچنین قطبش‌های سطحی باشد چون عیوب و نقص‌ها می‌توانند در به وجود آمدن قطبش‌های دوقطبی و در نتیجه آرامش آن‌ها کمک کنند اعوجاج در نمودار نشان‌دهنده فعالیت دوقطبی‌ها و توانایی آن‌ها در پاسخ به میدان الکتریکی است وجود نیم‌دایره در نمودار بیانگر این است که چندین مکانیزم واهلش در این مواد فعال هستند، که هر یک می‌تواند به بهبود خاصیت جذب مواد کمک کند به طور همزمان افت رسانا و افت پلاریزاسیون اتفاق می‌افتد که افت رسانایی پدیده غالب است [۲۴-۲۷].

۴- نتیجه گیری

طراحی موثر ما ساخت نانو کامپوزیت صفحه‌ای سه گانه MoSe₂/MMT/MWCNT با استفاده از روش ساده و دو مرحله‌ای هیدروترمال است نتایج آنالیز xrd فاز 2H-MoSe₂ و سایر اجزا را تایید کرد، طراحی نانومواد با ساختار دو بعدی سلسله‌مراتبی می‌تواند شبکه‌های رسانای متقابل را ایجاد کرده و مسیر انتقال امواج الکترومغناطیسی را طولانی‌تر کند. این روش به‌عنوان یک استراتژی کارآمد برای بهبود

یا از نقص‌ها یا فصل مشترک بین لوله‌های مختلف در پاسخ به موج EM می‌پزند که به ترتیب مهاجرت و جهش نامیده می‌شوند، انتقال الکترون در شبکه MWCNT را می‌توان به صورت یک سری مدار ساده کرد، این پدیده با افزایش فرکانس موج EM افزایش می‌یابد. بنابراین، می‌تواند یکی از عواملی باشد که منجر به افزایش اتلاف دی‌الکتریک با افزایش فرکانس شود [۲۱-۲۳].

منحنی‌های کول-کول (ε''-ε') در شکل ۵ شامل نیم‌دایره‌هایی هستند که فرایند واهلش دوقطبی دبای در نمونه‌های MoSe₂/MMT/ و MoSe₂/MMT/MWCNT را نشان می‌دهد، این نیم‌دایره‌ها با فرمول دبای به شکل زیر محاسبه شدند:

$$(\epsilon' - \epsilon_{\infty})^2 + (\epsilon'')^2 = (\epsilon_s - \epsilon_{\infty})^2 \quad (3)$$

در این فرمول ε_∞ نشان‌دهنده گذردهی در فرکانس نامحدود و ε_s نشان‌دهنده گذردهی ایستا است نمونه‌ی MoSe₂/MMT/ نسبت به MoSe₂/MMT/MWCNT دارای اعوجاج بیشتری است اما در حضور MWCNT تحت فرآیندهای آرام‌سازی پلاریزاسیون که شامل نیم‌دایره‌های بیشتری است قرار گرفت. تعداد نیم‌دایره‌ها نشان‌دهنده تعداد فرآیندهای آرامش دی‌بای است که معمولاً در فصل مشترک ناهمگن MoSe₂/MMT/MWCNT رخ می‌دهد و همچنین آرامش دی‌الکتریک، قطبش و دوقطبی، فرآیندهایی

- Nitrogen-Doped Chitosan Carbon Fiber with Excellent Electromagnetic Wave Absorbing Performance," *Nanomaterials*, 14(7), 587, 2024. <https://doi.org/10.3390/nano14070587>
- [3] H.Si, Y.Zhang, Y.Liu, Z.Jiang, C.Li, J.Zhang, and C.Gong, "Structural design in reduced graphene oxide (RGO) metacomposites for enhanced microwave absorption in wide temperature spectrum," *Journal of Materials Science & Technology*, 206, 211-220, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.04.011>
- [4] L.Ma, Z.Dou, D.Li, J.Liu, Y.Xu, G.Wang, "Facile synthesis of nitrogen-doped porous Ni@C nanocomposites with excellent synergistically enhanced microwave absorption and thermal conductive performances," *Carbon*, 201, 587-598, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.09.055>
- [5] F. C. D.Reis, C.V.Opelt, L. A. F. Coelho, M. R.Baldan, B.Ribeiro and M. C. Rezende, "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Clay, Alumina, and Carbon Nanotubes Based on Epoxy Nanocomposites," *Materials Research*, 27, 20240036, 2024. <https://doi.org/10.1590/1980-373-mr-2024-0036>
- [6] X. Y.Fu, Q.Zheng, L. Li, and M. S. Cao, "Vertically implanting MoSe₂ nanosheets on the RGO sheets towards excellent multi-band microwave absorption," *Carbon*, 197, 324-333, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.06.037>
- [7] A. K.Darboe, X.Qi, X.Gong, Q.Peng, Y.Chen, R.Xie and G.Wu, "Constructing MoSe₂/MoS₂ and MoS₂/MoSe₂ inner and outer-interchangeable flower-like heterojunctions: A combined strategy of interface polarization and morphology configuration to optimize microwave absorption performance," *Journal of Colloid and Interface Science*, 624, 204-218, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.05.078>
- [8] Z.Wang, H. Y.Yue, Z. M.Yu, F.Yao, X.Gao, E. H.Guan, and S.S.Song, "One-pot hydrothermal synthesis of MoSe₂ nanosheets spheres-reduced graphene oxide composites and application for high-performance supercapacitor," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 8537-8545, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01174-7>
- [9] X.Qi, J.Xu, Q.Hu, Y.Deng, R.Xie, Y.Jiang and Y.Du, "Metal-free carbon nanotubes: synthesis, and enhanced intrinsic microwave absorption properties," *Scientific reports*, 6(1), 28310. 2016. <https://doi.org/10.1038/srep28310>
- [10] L.Xiang, A. K.Darboe, Z.Luo, X.Qi, J.Shao, X. J.Ye and W.Zhong, "Constructing two-dimensional/two-dimensional reduced graphene oxide/MoX₂ (X= Se and S) van der Waals heterojunctions: a combined composition modulation and interface engineering عملکرد امواج الکترومغناطیسی در نظر گرفته می‌شود. ترکیب MoSe₂/MMT در حضور ساختار لایه ای از مونت موریلونیت منجر به ایجاد همزمان یک ناحیه تماس وسیع به منظور دستیابی به قطبش قوی در سطح و فعال سازی تعداد بیشتری از نقاط برای بازتاب و پراکندگی امواج الکترومغناطیسی چندگانه را ایجاد می‌کند، نانولوله های کربنی با ویژگی های الکترونیکی خاص خود و دی سلنید مولیبدن نیز به عنوان یک نیمه هادی دو بعدی و گاف انرژی مناسب دارای بار های منفی غالب روی سطح خود هستند در مطالعات جذب مایکروویو در باندهای x و ku نانوکامپوزیت MoSe₂/MMT دارای مقدار حداقل افت بازتاب ۲۸- دسی بل با پهنای باند ۲٫۳۳ گیگاهرتز با ضخامت ۱/۹ میلی متر است در حضور MWCNT مقدار حداقل افت بازتاب به ۶۷٫۰۲- دسی بل در فرکانس ۱۴٫۹۰ با پهنای باند ۷۸٫۴ در ضخامت ۱٫۴ میلی متر افزایش یافت و در نتیجه، این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که طراحی مواد جذب کننده امواج الکترومغناطیسی با افت بازتاب عالی و پهنای باند جذب مؤثر وسیع در ضخامت های کم، می‌تواند از طریق به کارگیری تکامل ساختاری سلسله مراتبی تحقق یابد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافع مالی، علمی، یا شخصی مرتبط با طراحی، اجرای پژوهش و نگارش این دست‌نوشته وجود ندارد.

منابع

- [1] J.Lu, Y.Wang, L.Wang, D.Liu, L.Zhou, C.Wei, and G.Wen, "Construction of chitosan-derived porous nest-like C/SnO₂ materials for microwave absorption," *International Journal of Biological Macromolecules*, 254, 127851, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127851>
- [2] M.Guo, M.Lin, J.Xu, Y.Pan, C.Ma, and G. Chen, "Reduced Graphene Oxide Modified

- [19] H.Gaihua, Y.Duan, and H.Pang, "Microwave absorption of crystalline Fe/MnO@C nanocapsules embedded in amorphous carbon," *Nano-micro letters*, 12, 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0388-4>
- [20] X.Wang, W.Zhang, X.Ji, B.Zhang, M.Yu, W.Zhang and J.Liu, "2D MoS₂/graphene composites with excellent full Ku band microwave absorption," *RSC Advances*, 6(108), 106187-106193, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6RA22817H>
- [21] J.Qiu, X.Liu, C.Peng, S.Wang, R.Wang and W.Wang "Porous metal microsphere M@C-rGO (metal= Mn, Fe, Co, Ni, Cu) aerogels with high low-frequency microwave absorption, strong thermal insulation and superior anticorrosion performance," *Journal of Materials Chemistry A*, 12(33), 21997-22012, 2024. <https://doi.org/10.1039/D4TA04051A>
- [22] Z.Wang, P.Zhao, D.He, Y.Cheng, L.Liao, S.Li and P.Li, "Cerium oxide immobilized reduced graphene oxide hybrids with excellent microwave absorbing performance," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(20), 14155-14165, 2018. <https://doi.org/10.1039/C8CP00160J>
- [23] H.Si, Y.Zhang, Y.Liu, Z.Jiang, C.Li, J.Zhang, and C.Gong, "Structural design in reduced graphene oxide (RGO) meta-composites for enhanced microwave absorption in wide temperature spectrum," *Journal of Materials Science & Technology*, 206, 211-220, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.04.011>
- [24] F.Farahmandzadeh, H.Hekmatara and M. Molaei, "Preparation of rGO/MoSe₂ nanocomposites for enhanced microwave absorption of whole X and Ku bands," *Dalton Transactions*, 53(15), 6631-6641, 2024. <https://doi.org/10.1039/D3DT04012G>
- [25] B. Fan, L. Xing, K. Yang, F. Zhou, Q. He, G. Tong and W. Wu, "Synergistically enhanced heat conductivity-microwave absorption capabilities of g-C₃N₄@Fe@C hollow micro-polyhedra via interface and composition modulation," *Chemical Engineering Journal* 451, 12316-12327, 2023.
- [26] R. Shu, Y. Wu, Z. Li, J. Zhang, Z. Wan, Y. Liu and M. Zheng, "Facile synthesis of cobalt-zinc ferrite microspheres decorated nitrogen-doped multi-walled carbon nanotubes hybrid composites with excellent microwave absorption in the X-band," *Composites Science and Technology*, 184, 107839, 2019.
- [27] Y. S. Fatemipannah, S.Alamdari, M.H. Majlesara "Synthesis of CsPbCl₃/Graphene Oxide Perovskite Nanocubes with Enhanced Luminescence in Room-Temperature. *Nanomeghyas*, 12, 128-134, 2025. doi: 10.22034/ns.2025.2064893.1394
- strategy for microwave absorption," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 6, 215, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42114-023-00793-3>
- [11] X. H.Zhang, C. Y.Wei, L. L.Zha, J. W. Chen, J. W.Wang, H. L.Yu and J. H. Wu, "Facile one-pot synthesis of polypyrrole-coated magnetic montmorillonite for enhanced microwave absorption and sunlight-induced heat generation," *Journal of Alloys and Compounds*, 971, 172676, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.172676>
- [12] X.Zhang, Z.Fu, X.Wang, F.Meng, R.Wei, Y. Li and S.Du "High-performance microwave absorption of hierarchical graphene-based and MWCNT-based full-carbon nanostructures," *Applied Surface Science*, 493, 541-550, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.06.301>
- [13] X.Yang, Z.Zhang, Y.Fu and Q. Li, "Porous hollow carbon spheres decorated with molybdenum diselenide nanosheets as anodes for highly reversible lithium and sodium storage," *Nanoscale*, 7(22), 10198-10203, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5NR01909E>
- [14] S. F.Almojil and A. I.Almohana, "Montmorillonite clay decorated with Al-Mg LDH as a strong and retrievable nanocomposite for decontamination of wastewater containing chromium (VI) and arsenic (III) toxic ions," *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-17, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05294-x>
- [15] H.Wang, G.Liu, J.Lu, M.Yan and C.Wu, "A doping strategy to achieve synergistically tuned magnetic and dielectric properties in MoSe₂ for broadband electromagnetic wave absorption," *Applied Physics Letters*, 123(6), (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0164697>
- [16] R.Moučka, M.Mravčáková, J.Vilčáková, M.Omastová and P.Sáha, "Electromagnetic absorption efficiency of polypropylene/montmorillonite/polypyrrole nanocomposites," *Materials & Design*, 32(4), 2006-2011, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.064>
- [17] M.Deighani-Dashtabi, H.Hekmatara, "Structural, electrical and EMI shielding property of carbon nanotube decorated magnetic/ceramic nanoparticles," *Scientific Reports*, 15(1), 1311, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85378-4>
- [18] M. Arabi, S.M. Baizaee, H. Hekmatara, "Microwave absorption property of GO-Fe/FeO-NiO HNFs: GO decorated Fe/FeO-NiO hexagonal flakes with a 2D/0D/2D structure," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25, 9925-9934, 2023. <https://doi.org/10.1039/D3CP00977G>