کاربرد مواد سرامیکی و نانو مواد در توسعه تجهیزات ارتباطی نسل پنجم (5G)

ابوالفضل شانقی[1*]، علی شانقی[2]

[1] دانشکده برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی
[2] گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

*ab.shanaghi@gmail.com

مهندس ابوالفضل شانقی، نویسنده اول مقاله، دانشکده برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

چکیده: امروزه، افزایش سریع تعداد دستگاه‌های تلفن همراه، داده‌های حجیم، و نرخ داده بالاتر، توسعه ارتباطات بی‌سیم نسل پنجم[1] (5G) را بسیار مورد توجه قرار داده است. شبکه‌های 5G به طور گسترده با سه ویژگی منحصر به فرد مشخص می‌شوند، که عبارتند از اتصال فراگیر، تاخیر بسیار پایین، و انتقال داده بسیار سریع از طریق اتخاذ فن‌آوری جدید همانند نانوآنتن‌ها. ساخت نانو آنتن‌ها وابسته با خواص نانو مواد و سرامیک‌های با خاصیت الکترومغناطیس و دی الکتریک ویژه همراه با مورفولوژی نانو ساختار می‌باشد. شیشه- سرامیک‌ها برای وسایل بی‌سیم 5G سرامیکی پخت شده با دمای پایین[2] (LTCC) خواص مایکروویو عالی دارند، همچنین گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانومواد فلزی و فرامواد، دارای کاربرد گسترده‌ای در امواج با پهنای باند میلیمتری هستند، که مورفولوژی و خواص الکترومغناطیسی آنها تاثیر قابل توجهی در بازدهی و تجاری سازی تجهیزات 5G دارد. در این مقاله بطور کلی کاربرد سرامیک‌ها و مواد نانوساختار گرافن، نانوتیوپ‌های کربن و نانو مواد فلزی در گسترش نانو آنتن‌ها و تجهیزات 5G مورد بحث قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: نانو مواد، شیشه-سرامیک، گرافن، نانو تیوپ‌های کربن، تجهیزات ارتباطی نسل پنجم 5G.

۱- مقدمه

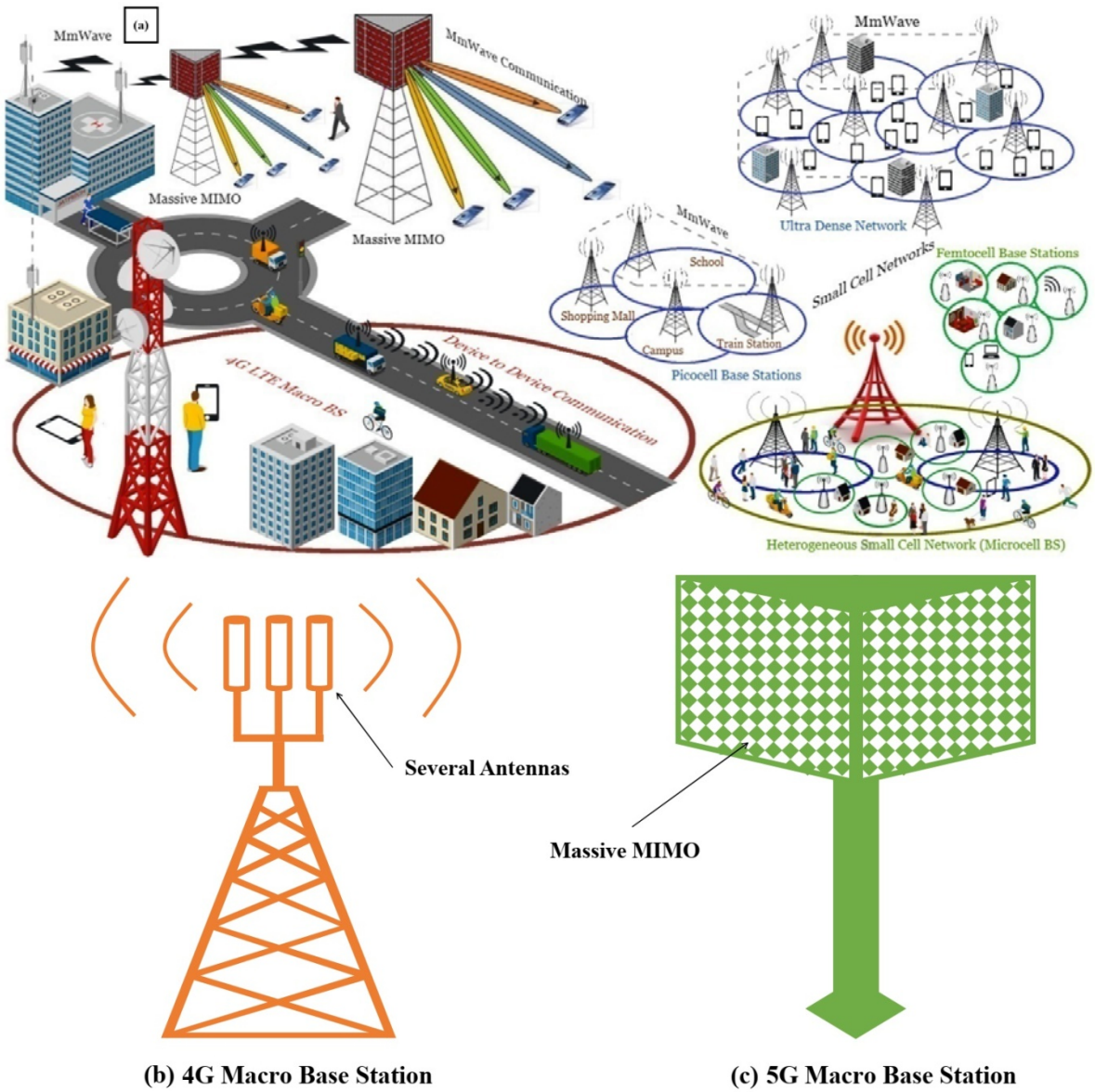
توسعه علمی و تکنولوژیکی ارتباطات بی‌سیم برای جامعه و مردم در زندگی روزمره آن‌ها سودمند است [۱- ۳]. پیشرفت و تقاضا در جامعه، به نوبه خود، نوآوری و توسعه سیستم‌های ارتباطات بی‌سیم را گسترش داده است. در دهه پیش رو، استفاده و کاربردهای بسیار زیاد ارتباط‌های مخابراتی، منجر به افزایش قابل توجه ترافیک تلفن همراه بوسیله میلیاردها اتصال برای دستگاه‌های ارتباطی در مقایسه با آنچه که امروز تجربه می‌شود، مورد نیاز باشد. علاوه بر این، توسعه سریع خدمات ضروری از جمله بانکداری الکترونیک، آموزش الکترونیک، سلامت الکترونیک و تجارت الکترونیک باعث رشد زیادی در حجم داده‌ها شده و نیاز به تاخیر کم و قابلیت اطمینان بالا برای کاربردهای پشتیبانی دارد [۴-۶]. همچنین تقاضای بازی‌های الکترونیکی با استفاده از واقعیت و واقعیت مجازی به تدریج از طریق سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم در حال گسترش می‌باشد [۷-۸]. که بایستی طیف گسترده‌ای از نرخ داده‌ها تا چندین گیگابایت در ثانیه پشتیبانی شود و ده‌ها مگابایت در ثانیه باید دارای قابلیت دسترسی با اطمینان بالا باشند [۷-۱۰]. در این میان، ارتباطات بی‌سیم 5G بر پایه نسل چهارم 4G می‌تواند نیازهای عملکردی ذکر شده را تامین نماید و قابلیت‌های عظیم داده، حجم تماس‌های نامحدود و انتشار داده‌های نامحدود را ارائه دهد. در واقع ارتباطات بی‌سیم 5G یک سیستم همگرا با فن‌آوری دسترسی رادیویی چندگانه یکپارچه است [۱۱-۱۳]، که در مقایسه با 4G، فرکانس و طیف بالاتری را پشتیبانی می‌کند و بر روی امواج میلیمتری ۳۰ – ۱۰۰ GHZ کار می‌کند [۱۴-۱۸]، که بطور شماتیک در شکل ۱ خلاصه‌ای از تکنولوژی 5G و آنتن‌های مورد استفاده در ایستگاه‌های 4G و 5G بطور شماتیک نشان داده است.

[1] Fifth-generation wireless communications
[2] low-temperature co-fired-ceramic
[3] Metamaterials

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

نانو فناوری، که مجموعه‌ای از ابزارها را برای ایجاد اجزای نانو مقیاس فراهم می‌کند، به طور گسترده‌ای در ارتباطات بی‌سیم 5G مورد استفاده قرار گرفته‌است. اندازه کوچک نانومواد نیز تحریک‌ها و حرکات بار در نانومواد را محدود و ساختارهای الکترونیکی پیوسته را مجزا می‌کند و به تدریج طیف نوری را به طور ناگهانی تغییر می‌دهد. همچنین مواد نانوساختار در برهمکنش با میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی یا هر دو میدان، عملکرد جذب امواج را به طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و برای جذب مایکروویو و تحریک اثر متقابل نور و ماده در ناحیه گیگا هرتز طیف الکترومغناطیسی به می‌توان ار مواد نانوساختار جهت افزایش بازدهی استفاده نمود [۱۸–۲۲]. پاسخ الکترومغناطیسی نانومواد توسط گذردهی[1] و نفوذپذیری[2] تعیین می‌شود، که مرتبط با ذخیره‌سازی و اتلاف انرژی است، که به طور عمده مقدار اتلاف بازتاب در سطح مشترک نانو مواد – اتمسفر را تعیین می‌کند. اما بیشترین انعکاس یا اتلاف امواج ماکروویو توسط زیر لایه رخ می‌دهد [۲۳].



شکل ۱– a) شماتیک کاربرد فناوری‌های پیشرفته بر پایه ارتباطات بی‌سیم 5G، که منجر هوشمندتر، سریع‌تر و کارآمدتر تجهیزات ارتباطی گردیده است، b) آنتن‌های مورد استفاده در ایستگاه 4G، c) آنتن‌های مورد استفاده در ایستگاه 5G [۱۷].

[1] Permittivity
[2] Permeability

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

بنابراین خواص دی الکتریک و مغناطیسی زیرلایه‌ها و نانو ساختارهای مورد استفاده در تجهیزات ارتباطی نقش بسیار مهمی در تضعیف امواج الکترومغناطیس و یا افزایش بازدهی عملکرد آنها باز می‌کنند [۲۴]، که این هم وابسته با نوع مواد مورد استفاده در ساخت تجهیزات ارتباطی است همانند سرامیک‌ها و نانوفلزها و هم نوع مورفولوژی و ساختار آنها، که بایستی به کمک فرایندهای شبیه سازی ملکولی[1] (MD) رابطه بین ساختار و خواص مواد در مقیاس نانو تعیین گردد، زیرا که استفاده از سرامیک‌های پیشرفته و توسعه مواد نانو ساختار برای تجهیزات مخابراتی فرکانس بالا و دستگاه‌های الکترونیکی با سرعت فوق‌العاده بالا بسیار مهم است.

در این مقاله پیشرفت‌های اخیر در زمینه کاربرد مواد نانوساختار همانند شیشه– سرامیک‌ها، گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNT)، مواد نانو فلزی و فرامواد برای تجهیزات ارتباطی 5G مورد بحث قرار گرفته است.

۲- مواد پیشرفته مورد استفاده در گسترش فناوری 5G

۲-۱- شیشه- سرامیک‌ها

تجهیزات سرامیکی که در فرکانس‌های مایکروویو و ثابت‌های دی‌الکتریک پایین ($\varepsilon r<10$) عمل می‌کنند، با توجه به کاربردهای امیدبخش خود در فن‌آوری‌های مخابراتی 5G در فرکانس‌های زیر ۶GHz، ۲۸GHz و ۳۸GHz مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۵–۲۸]. در این میان شیشه سرامیک‌های پخته شده در دمای پایین (LTCCs) به دلیل مقرون به صرفه بودن در ساخت میکروالکترونیک برای توسعه نسل بعدی دستگاه‌های ریزموج و چند لایه آنتن/ فیلتر فرکانس‌های بالا مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۲۹–۳۱].

در تحقیقات جدید از آلومینا در ساخت شیشه‌های $CaO-Al_2O_3-B_2O_3-SiO_2$ استفاده می‌شود، که در این مواد LTCC سنتی، آلومینا به عنوان پرکننده دی‌الکتریک در ماتریس شیشه‌ای عمل می‌کند. با این حال، حضور یک محتوای شیشه‌ای بالا، به دلیل جذب مایکروویو در فاز شیشه، اتلاف بالایی را در محدوده مایکروویو (>1 GHz) ایجاد می‌کند [۳۲–۳۴]. دوم، سیستم‌های شیشه – سرامیک با بلورینگی بالا، ثابت دی‌الکتریک پایین و عوامل با کیفیت بالا که می‌توانند با استفاده از مواد دیگر مانند $CaO-SiO_2$- $La_2O_3-B_2O_3-CaO$ (LBC), B_2O_3(CSB)، ولاستونیت[2]، کوردیریت[3] و شیشه– سرامیک دیوپسید[4] تولید شوند، که این ترکیبات تلفات تانژانت کمتری را در ناحیه GHz نشان می‌دهند و ساخت دستگاه‌هایی با خواص عالی را ممکن می‌سازند [۳۵–۳۸]، البته در شیشه– سرامیک CSB افزایش مقدار B_2O_3 در ساختار باعث ایجاد ریزساختاری فشرده و با افزایش شدت بلورینگی CaB_2O_4 شده، که منجر به افزایش قدرت سرامیک CBS می‌شود. با این حال، هنگامی که مقدار B_2O_3 بیش از ۲۵ درصد شود، دی‌الکتریک و خواص مکانیکی به دلیل بیش از حد فاز شیشه به سرعت کاهش می‌یابد[۱۷]. تحقیقات بیانگر وجود سیستم‌ها با ثابت‌های دی‌الکتریک پایین ($\varepsilon r \sim 7.8$)، فاکتورهای با کیفیت بالا ($\tan\delta \leq 0.001$) در محدوده GHz و پایداری حرارتی گسترده (قابل بررسی توسط توسط ضریب دمای صفر در فرکانس رزونانس) در شیشه–سرامیک‌های بر پایه $CaO-MgO-SiO_2$ (CMS) است [۳۹–۴۰].

بنابراین شیشه–سرامیک‌های با اتلاف تانژانت کم انتخاب اصلی برای استفاده در کاربردهای ارتباطی بی‌سیم در محدوده مایکروویو هستند. بطور کلی متناسب با کاربرد سرامیک‌ها از دیدگاه دی الکتریک و پایداری دمایی، دو گروه سرامیک تعریف می‌شود،که عبارتند از: اول، سرامیک‌ها با ثابت دی الکتریک پایین، که در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰GHz پایداری دمایی نیاز است و مواد بایستی دارای Q بالا و ثابت‌های دی‌الکتریک در محدوده ۶ تا ۱۸ GHz باشند. دوم، سرامیک‌های دارای Q فوق‌العاده بالا و ثابت دی الکتریک کمتر از ۳۰، که در این حالت میزان Q با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، اما برای داشتن اتلاف تانژانتی کم مخصوصا در فرکانس‌های بالاتر از ۲۸ GHz نیاز به مواد با Q فوق العاده زیاد است.

[1] Molecular dynamics
[2] Wollastonite
[3] Cordierite
[4] Diopside

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

جدول ۱- سرامیک‌ها با ثابت دی‌الکتریک پایین [۱۸].

Material	ε'	Qf > 50000
Cordierite	4-5	112500
Eucryptite $LiAlSiO_4$	5.3	80000
Li_2MgSiO_4	5.6	80000
Forsterite + Cordierite	6.0	No
Forsterite (Mg_2SiO_4)	6.6	No
Willemite (Zn_2SiO_4)	6.6-7.5	147000
Celsian $(Sr,Ba)Al_2Si_2O_8$	7.2	77000
Spinel ($MgAl_2O_4$)	8.5	105000
Alumina (Al_2O_3)	10.0	634000

۲-۲- گرافن

ارتباطات 5G به آنتن‌هایی با ظرفیت بیشتر، طیف بی‌سیم گسترده‌تر، بهره بالا و قابلیت هدایت بیشتر در مقایسه با 4G نیاز دارد و آنتن‌های معمولی به دلیل محدودیت‌های ساخت و نصب در اندازه‌های کوچک‌تر، قادر به تامین فرکانس بالای نمی‌باشند. همچنین نانوذرات فلزی معمولا برای ایجاد اتصال هدایتی در آنتن‌ها استفاده می‌شوند، که بالا بودن سطح ویژه نانو ذرات منجر به افزایش واکنش پذیری آنها با محیط اطراف و افزایش شدت تخریب و خوردگی نانو ذرات فلزی در مقایسه با بالک فلزی می شود[۶۴-۶۶]. لذا استفاده از مواد نانو مرتبط با کربن مانند گرافن و نانو تیوپ‌های کربن (CNTs) با اندازه‌های کوچک‌تر و ابعاد نازک‌تر که قادر به انتشار فرکانس‌های بالا می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴۱-۴۴].

گرافن دارای یک لایه منفرد از اتم‌های کربن در یک ساختار هگزاگونال است با خواص ویژه‌ای همانند جمله انتقال بار در دمای اتاق حدود $2000000 cm^2 V^{-1} s^{-1}$، مدول یانگ ۵/۱TPa، استحکام شکست ۱۲۵GPa، و هدایت گرمایی $5000 W m^{-1} K^{-1}$، آن را در گروه سفت‌ترین مواد با بالاترین تحرک بار در نظر می‌گیرند. همچنین گرافن دارای رسانایی بالایی تا $9/4 * 10^8 S / m$ و مقاومت ورقه‌ای کم‌تر از $30 \Omega / m$ با شفافیت نوری ۹۰ ٪ می‌باشد و به دلیل ویژگی‌های سوئیچینگ عالی و خواص قابل تنظیم، به یک ماده جذاب برای تولید نجهیزات الکترونیکی با سرعت فوق‌العاده بالا تبدیل شده‌است. بطور مثال، رسانایی یکی از مهم‌ترین خصوصیات آنتن‌های مبتنی بر گرافن است که می‌تواند از طریق ولتاژ بایاس اعمالی و روش‌های دوپینگ کنترل شود [۷۱، ۷۵] وآنجایی که یک لایه گرافن ضخامتی در حدود یک اتم دارد، امکان ذخیره کردن الکترواستاتیکی قابل توجه همراه با انعطاف‌پذیری بسیار بالا را فراهم می‌نماید. تک لایه‌های گرافن می‌توانند حتی در فرکانس‌های تراهرتز، با اتلاف متوسط و میدان قوی موضعی، از امواج پلاریتون پلاسمون[1] (SPP) سطح فوق‌العاده محدود شده پشتیبانی می‌نمایند [۱۸ و ۴۵-۴۷]. به طور خاص، امواج SPP امواج الکترومغناطیسی هستند که در امتداد فصل مشترک فلز - دی‌الکتریک هدایت می‌شوند و در فرکانس‌های بالا تولید می‌شوند [۷۹، ۸۰]. همچنین گرافن از نظر پتانسیل شیمیایی، می‌تواند غلظت‌های بسیار بالای الکترون انتقال دهد [۴۷-۴۸].

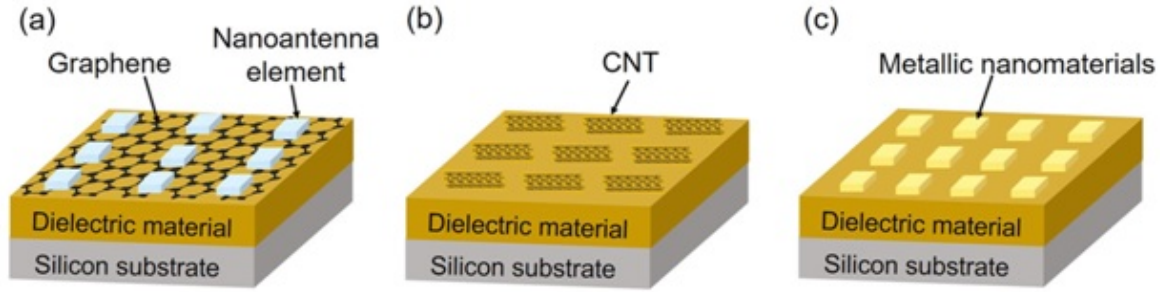
براساس این خواص، گرافن یک ماده بالقوه برای استفاده در قسمت‌های الکترونیکی آنتن‌ها مخابراتی، جهت ساخت آنتن‌هایی با اندازه‌های کوچک‌تر و ابعاد نازک‌تر با توانایی انتشار فرکانس‌های بالا می‌باشد [۸۳، ۸۴]. در شکل ۲ شماتیک ساختار نانو آنتن‌های مبتنی بر گرافن، نانو تیوپ‌های کربن و نانو مواد فلزی همراه با یک لایه میانی سرامیکی دی الکتریک بر روی زیر لایه

[1] Plasmon polariton

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

سیلیکونی به ترتیب نشان داده است. نانوآنتن‌های مبتنی بر گرافن از سطح تراشه کوچکتری نسبت به همتایان فلزی برخوردار هستند که می‌توانند در محدوده طیف وسیع فرکانسی عمل نمایند، که صدها برابر کوچک‌تر از آنتن‌های میکرواستریپ معمولی بوده و پهنای باند و بهره بیشتری نسبت به نانوآنتن‌های فلزی دارند و با کنترل رفتار الکتریکی و دوپ کردن عناصر شیمیایی در ساختار هگزاگونال گرافن می‌توان سرعت‌های انتقال داده تا حد ترابیت بر ثانیه رسید [۴۹-۵۰].



شکل ۲- شماتیک ساختار نانو آنتن‌های مبتنی بر a) گرافن، b) نانو تیوپ‌های کربن و c) نانو مواد فلزی همراه با یک لایه میانی سرامیکی دی الکتریک بر روی زیر لایه سیلیکونی [۱۸].

۲-۳- نانو تیوپ‌های کربن (CNT)

نانو تیوپ‌های کربن مواد تک‌بعدی هستند، که به دلیل خواص الکترونیکی و الکترومغناطیسی غیر معمول همانند دو قطبی‌های انتقالی هم محور، جذب بالای مقاطع عرضی و بازده کوانتومی بالا، به عنوان مواد نانوآنتن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدایت الکتریکی بسیار بالا در نزدیکی حدود کوانتومی، تلفات مقاومتی در آنتن به حداقل رسانده، همچنین ساختار تقریبا بدون نقص CNTها همنجر به کاهش قابل توجه اتلاف توان گردیده است [۵۱-۵۳]. مطابق شکل ۲b، حرکت الکترون در CNTها ناشی از انتقال بالستیک از طریق نانولوله‌ها است و خواص الکتریکی نانوتیوپ‌های کربن می‌توانند به دو صورت هادی و نیمه هادی باشد، که نانو تیوپ‌های هادی فاقد انرژی باند گپ و نیمه هادی‌ها متناسب با تابش مادون قرمز دارا انرژی بند پگی در حدود بیش از ۱/۵ الکترون ولت هستند [۵۴-۵۵]. بطور مثال، اگر پهنای تابش مادون‌قرمز و طیف جذبی در نانولوله‌ها در محدوده ۱۵/۰ الکترون ولت باشد، انتظار می‌رود که تقریبا ۱۰ کانال فرکانسی متفاوت ایجاد شود. علاوه بر این، نور ساطع شده قطبیده شده و جذب نوری وابسته به قطبیده شدن است، که شدت قطبیدگی در امتداد محور نانولوله بیشتر است، و این امر باعث دو برابر شدن تعداد کانال‌های ارتباطی موجود با استفاده از نانولوله‌های موازی و عمودی می‌شود. نانو آنتن‌های مبتنی بر CNT قادر به موثر بودن جریان انرژی با توجه به شدت و جهت آن از طریق کنترل مناسب طول و خواص نانوتیوپ‌ها، گزینه‌ای مناسب برای مواد مورد استفاده در سیستم‌های مخابراتی 5G هستند، همچنین از آنجاییکه الکترون‌ها در CNT ها از طریق پیوند π اتم‌های کربن هدایت می شوند، که در ورقه‌های گرافیت نازک نیز اتفاق می‌افتد، در فرکانس‌های عملیاتی بالا در محدوده تراهرتز دارای کارایی قابل توجهی هستند [۵۶-۵۸].

بنابراین پایین بودن اتلاف توان نانو آنتن‌های مبتنی بر CNT منجر به بازدهی بالای آنها نسبت به آنتن‌های پایه فلزی با اندازه مشابه می‌گردد و هنگامی که چندین میکرو آمپر جریان را تحت ولتاژ اعمالی حمل می‌کند، حداکثر چند میکرو وات توان را به محیط اطراف خود منتشر می‌کند، که جهت افزایش محدوده ارتباطی مورد نیاز، امکان تقویت توان انتقال با استفاده از تعداد نانولوله به صورت موازی وجود دارد. اما بایستی توجه داشت امپدانس بسیار بزرگ نانو تیوپ‌های کربن در حدود ۱۰kΩ / μm منجر به مشکلات عدم انطباق نانو آنتن‌ها با خطوط معمولی انتقال داده‌ها که دارای امپدانسی در محدوده ۵۰ Ω / μm است، می‌گردد. علاوه بر خواص ذکر شده، رسانایی گرمایی بالا نانو آنتن‌های مبتنی بر گرافن ((۵،۰۰۰ W/(m K)) و مبتنی بر CNT (۲،۰۰۰W/(m K))، همراه با ساختار ویژه آنها همانند مساحت سطحی بالا منجر به افزایش سرعت کاهش دما نانو آنتها و قابلیت کاربرد آنها در دماهای بالا گردیده است [۵۹-۶۱]. همچنین افزایش بیش از حد دما منجر به اکسید شدن نانوتیوپ‌های کربن و گرافن گردیده، که اکسید گرافن نیز به دلیل جذب ماکروویو خوب در نانو آنتن‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۶۱]. نانو تیوپ‌های

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

کربن در دمای حدود ۷۰۰ درجه کلوین اکسید می‌شوند و بطور قابل توجهی خواص الکترومغناطیسی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. برای افزایش بازده هدایت حرارتی نانو آنتن‌های حاوی CNT ها از کامپوزیت آنها با ترکیبات سرامیکی همانند اکسید سیلیسیوم استفاده کرده، بطوریکه کامپوزیت CNT % 10 -SiO_2 دارای پایداری حرارتی از ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه کلوین هستند. بنابراین ترکیبات سرامیکی با درصدهای مختلف گرافن و CNT ها می‌توانند منجر به تولید نانو آنتن‌ها با خواص ویژه‌ای گردند. علاوه بر آن می‌توان با کمک رسوب دادن نانوذرات مانند CdS بر روی سطح CNT ها اثر دماهای بالا بر مقدار گذردهی را کاهش داد [۶۱-۶۲].

۲-۴-نانو مواد فلزی

اگرچه موجبرهای فلزی معمولاً تلفات و تداخل سیگنال کمی دارد، اما خیلی سخت است که ساختار آنها کوچک و یکپارچه گردد. تحقیقات مختلف بیانگر کاربرد نانو مواد فلزی در ساخت نانو آنتن‌های شبکه 5G است. به عنوان مثال، نانوساختارهای نانوذرات فلزی از رزونانس‌های پلاسمون سطحی[1] (SPRs)، که شامل نوسان چگالی بار است، حمایت کرده، و منجر به ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی موضعی در فصل مشترک بین فلز و دی‌الکتریک می گردد. رزونانس‌های پلاسمون سطحی موضعی همراه با نوسانات الکترون‌های آزاد تجمیع شده، می‌توانند میدان بزرگی را در یک حجم بسیار کوچک ایجاد کنند [۱۴۳۶۳-۶۵]. در واقع ویژگی کلیدی نانوذرات فلزی، فرکانس پلاسمون‌های سطحی موضعی است که به اندازه، شکل و ترکیب نانوذرات و همچنین حساسیت به محیط دی‌الکتریک وابسته است [۱۴۵- ۱۴۷]. مطابق شکل ۲c، نانو آنتن‌های مبتنی بر نانومواد فلزی دارای ویژگی‌های جذاب بسیاری همانند افزایش جهت گیری[2]، کنترل قطبش[3]، بهبود شدت[4]، افزایش نرخ تاخیر[5] و شکل‌دهی طیفی[6] می‌باشند [۱۵۰-۱۵۲]. با این حال علاوه بر ویژگی ذاتی نانو مواد فلزی و اندازه و شکل نانو ذرات فلزی، طول‌موج رزونانس و شدت میدان‌های موضعی در نانوآنتن‌های فلزی وابسته به هندسه ساختاری و ضریب شکست محیط اطراف نیز می‌باشند [۶۵-۶۷].

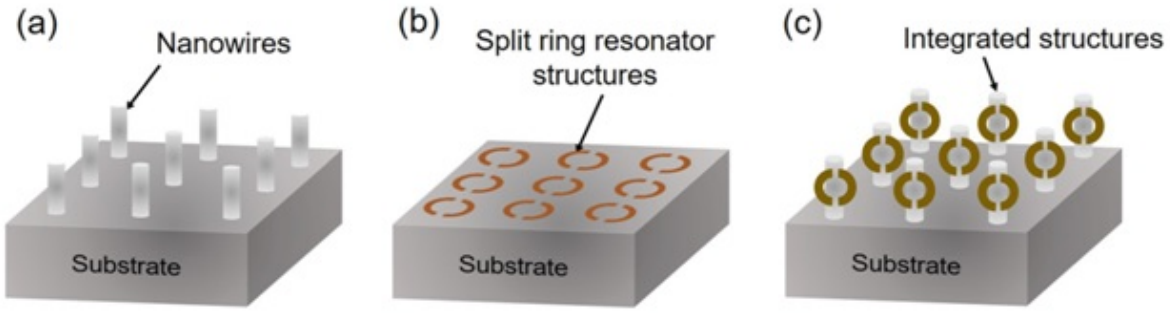
علاوه بر ترکیبات سرامیکی، گرافن، نانوتیوپ‌های کربن و ناذرات فلزی، دسته ای دیگری از مواد به نام فرامواد[7]، به دلیل خواص الکترومغناطیسی منحصر به فرد به عنوان موادی برای افزایش عملکرد نانوآنتن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرا موادها دارای ساختاری مصنوعی هستند که از مجموعه‌های عناصر متعدد از مواد کامپوزیتی همانند فلزات و پلاستیک ساخته شده‌اند و برای فراهم کردن خواص الکترومغناطیسی که به راحتی در طبیعت در دسترس نیست، مهندسی شده‌اند. به عنوان مثال، فرامواد می‌توانند ضریب گذردهی منفی و نفوذپذیری منفی در فرکانس یکسان داشته باشند. همچنین موج الکترومغناطیسی را می‌توان در جهت مخالف با انتشار موج در مواد فرامواد شکست داد [۱۵۵]. فرامواد را می‌توان به انواع مختلفی از جمله فرامواد منفی الکتریکی، فرامواد منفی مغناطیسی و فرامواد منفی دوتایی براساس گذردهی الکتریکی و تراوایی ایجاد شده توسط ساختارهای مختلف طبقه‌بندی کرد. در شکل ۳ ساختار فرامواد با خواص الکترومغناطیسی مختلف برای آرایه آنتن نشان داده شده، که فرامواد منفی الکتریکی[8] می‌توانند از سیم‌های نازک فلزی برای به دست آوردن مقادیر منفی گذردهی استفاده کنند. سیم‌های فلزی موازی، رفتار عبور بالا را برای یک موج صفحه‌ای ورودی نشان می‌دهند و میدان الکتریکی آن‌ها موازی با سیم‌ها است. همچنین فرامواد منفی مغناطیسی[9] با مقدار تراوایی منفی می‌توانند ساختاری از تشدیدگر حلقه مجزا داشته باشند که از دو حلقه فلزی هم مرکز تشکیل شده‌است و توسط یک شکاف از هم جدا شده‌اند. فرامواد منفی دو گانه[10] دارای ضریب شکست منفی بوده و ساختار آن‌ها ترکیبی از ساختارهای مبتنی بر سیم نازک با ساختارهای مبتنی بر تشدیدکننده حلقه‌ای است [۶۸-۶۹].

قابلیت تنظیم ویژگی‌های الکترومغناطیسی فرامواد با تغییر شکل، اندازه و جهت آرایش تشدیدکننده‌های مخصوص یا با دستکاری

[1] Surface plasmon resonances
[2] Directivity gain
[3] Polarization control
[4] Intensity enhancements
[5] Decay rate enhancement
[6] Spectral shaping
[7] Metamaterials
[8] Electric negative metamaterials
[9] Magnetic negative metamaterials
[10] Double-negative metamaterials

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

فعل و انفعالات میدان نزدیک بین آن‌ها به دست می‌آید. استفاده از فراماده در طراحی آنتن نه تنها به طور چشمگیری اندازه آنتن را کاهش می‌دهد، بلکه می‌تواند عملکرد نانوآنتن‌ها همانند افزایش پهنای باند، افزایش بهره و ایجاد فرکانس‌های چند باندی در عملکرد آنتن‌ها را بهبود بخشد. بطور کلی نانوآنتن‌های فراماده با طراحی و ساخت ساختارهای مصنوعی و ترکیبی از سرامیک‌ها، گرافن، CNT ها و نانو مواد فلزی می‌توانند بر کارایی محدود کننده و محدودیت پهنای باند برای نانوآنتن‌ها غلبه کنند [۷۰-۷۱].



شکل ۳- آرایه آنتن ساخته‌شده از فراماده با ساختارهای مختلف و خواص الکترومغناطیسی مختلف، a) نانوسیم‌های فراماده دارای مقدار گذردهی منفی و مقدار تراوایی مثبت، b) ساختاری از تشدیدگر حلقه‌ای جدا شده، متشکل از دو حلقه فلزی هم مرکز که با یک شکاف از هم جدا شده‌اند و دارای مقدار گذردهی مثبت و مقدار نفوذپذیری منفی هستند، c) نانوآنتن‌ها دارای یک ساختار یکپارچه از نانوسیم و تشدید کننده حلقه با مقدار گذردهی منفی و مقدار تراوایی منفی هستند [۱۸].

در جدول ۲ خواص الکتریکی، مکانیکی و گرمایی گرافن، CNTها و مس بطور خلاصه ذکر شده است. مطابق جدول‌های ۱ و ۲، بطور کلی نانو مواد حاوی شیشه- سرامیک ها، گرافن، CNTها، نانومواد فلزی و فراماده می‌توانند برای امواج میلی‌متری و حتی فرکانس باند تراهرتز استفاده شوند و خواص الکترومغناطیسی، یعنی گذردهی و نفوذپذیری آنها قابل تنظیم بوده و به شدت به ساختار آنها وابسته است که متناسب با شرایط کاربردی و محیطی می تواند خواص پراکنشی بهتری[1] برای ارتباط سیستم های 5G ایجاد کرد. بازده خواص پراکنشی نشان‌دهنده کارایی آنتن‌ها در انجام تبدیل از سیگنال‌های الکتریکی به امواج الکترومغناطیسی و تمرکز تابش است.

جدول ۲-خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی گرافن، CNTها و نانو ذرات مس[۱۸].

	هدایت الکتریکی (S/m)	ضریب انتقال الکترون در دمای اتاق ($cm^2\ V^{-1}\ s^{-1}$)	شدت جریان ($A\ cm^{-1}$)	ضریب هدایت حرارتی ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	مدول یانگ (GPa)
گرافن	108	2 × 105	109	5,000	1,500
CNT	106–107	8 × 104	109	3,000	270–950
مس	5.96 × 107	32	106	400	130

با توجه به خواص سرامیک‌ها، گرافن، CNT ها و نانوذرات فلزی و همچنین ویژگی اصلی ارتباطات بی‌سیم 5G همانند نرخ انتقال بالای داده، تاخیر انتقال بسیار پایین، و اتصال گسترده که می‌تواند همراه با بکارگیری امواج تراهرتز باشد. لزوم طراحی و پیشنهاد مواد با ساختار و ترکیب مناسب در طراحی و ساخت تجهیزات سیستم‌های ارتباطی 5G و 6G از اهمیت بسزایی برخوردار است، لذا همانطور که در کارهای تحقیقاتی می‌توان مشاهده کرد، که با توجه به محدودیت اندازه به چند نانومتر در ساخت مواد، استفاده مستقیم از روش‌های تجربی برای طراحی مواد و عناصر مجتمع شده با نانوابزارها دشوار، پر هزینه و زمان بر است، بنابراین شبیه‌سازی‌های MD را می‌توان برای طراحی نانوابزارها با خواص پیش‌بینی‌شده اتخاذ کرد و رابطه بین نانوساختار و خواص عناصر منفرد را می‌توان مشخص کرد، بطور مثال می‌توان با بکار بردن ترکیب و ساختار مطلوبی از نانوکامپوزیت‌های

[1] High radiation efficiency

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

جذبی دمای بالا در نانوآنتن‌ها برای کاهش مصرف انرژی استفاده نمود، به عنوان مثال، CNTها و گرافن می‌توانند با سرامیک‌هایی همانند SiC و SiO_2 به دلیل استحکام بالا، اکسیداسیون کم‌تر، پایداری حرارتی بالا و رسانایی حرارتی در دماهای بالاتر ترکیب شوند و یا اینکه نانوذرات فلزی و سرامیکی را بر روی سطح CNT ها و گرافن رسوب داده و سپس رابطه بین خواص الکترومغناطیسی و ترکیب و ساختار نانوکامپوزیت‌ها برای افزایش بازده سیستم‌های ارتباطی 5G و 6G بهینه گردد [۷۲-۷۳].

۳- نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش نیازهایی همانند فعال بودن سیستم‌های ارتباطی سریع در تمام مکان‌ها، قابلیت اطمینان بسیار بالا و تاخیر بسیار پایین انتقال داده‌ها، تقاضای بسیار زیادی جهت گسترش فناوری‌های 5G و بعد از آن 6G است، اما یکی از مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت تجهیزات مناسب سیستم‌های ارتباطی همانند آنتن‌های، نوع مواد همانند کامپوزیت‌ها، سرامیک‌ها، گرافن، CNT ها و مواد فلزی با ساختار نانو بوسیله نانو تکنولوژی است. بنابراین به به دلیل محدودیت‌های فن‌آوری و هزینه مواد آن و فناوری 5G در مراحل ابتدایی و منتظر کاهش هزینه نانوتکنولوژی و نانومواد می‌باشد. بالا بودن سرعت انتقال داده‌ها، افزایش تعداد نقل و انتقال داده‌ها و شدت افزایش امواج الکترومغناطیس منجر به افزایش قابل توجه دما در سیستم‌ها و تجهیزات فناوری‌های پیشرفته 5G گردیده که در نهایت بر روی کارایی و بازده آنها موثر است، لذا استفاده از ترکیبات سرامیکی که دارای پایداری حرارتی همراه با هدایت حرارتی و الکتریکی مناسب هستند درساختن کامپوزیت‌های پایه گرافن یا CNT ها می‌تواند منجر به افزایش عملکرد و بازده سیستم‌های 5G و در ادامه 6G که شامل بکارگیری امواج تراهرتز است، گردد.

مراجع

[1] Li Q, Niu H, Papathanassiou A, Wu G. 5G network capacity: key elements and technologies. IEEE Veh Technol Mag. 2014;9:71–8.
[2] Hossain S. 5G wireless communication systems. Am J Eng Res. 2013;2:344–53.
[3] Simko M, Mattsson MO. 5G wireless communication and health effects apragmatic review based on available studies regarding 6–100 GHz. Int J Environ Res Public Health. 2019;16:3406.
[4] Andrews JG, Buzzi S, Choi W, Hanly SV, Lozano A, Soong ACK, et al. What will 5G be? IEEE J Select Areas Commun. 2014;32:1065–82.
[5] Patil GR, Wankhade PS. 5G wireless technology. Int J Comput Sci Mobile Comput. 2014;3:203–7.
[6] Al-Nuaimi E, Al-Neyadi H, Mohamed N, Al-Jaroodi J. Applications of big data to smart cities. J Internet Serv Appl. 2015;6:1–15.
[7] Osseiran A, Boccardi F, Braun V, Kusume K, Marsch P, Maternia M, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications–the vision of the METIS project. IEEE Commun Mag. 2014;52:26–35.
[8] Papagiannakis G, Singh G, Thalmann NM. A survey of mobile and wireless technologies for augmented reality systems. Comput Animat Virt W. 2008;19:3–22.
[9] Demestichas P, Georgakopoulos A, Karvounas D, Tsagkaris K, Stavroulaki V, Lu J, et al. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network. IEEE Veh Technol Mag. 2013;8:47–53.
[10] Yaqoob I, Hashem IT, Gani A, Mokhtar S, Ahmed E, Anuar NB, et al. Big data: from beginning to future. Int J Inf Manage. 2016;36:1231–47.
[11] Atakan B, Galmes S, Akan OB. Nanoscale communication with molecular arrays in nanonetworks. IEEE T NanoBiosci. 2012;11:149–60.
[12] Chavez-Santiago R, Szydelko M, Kliks A, Foukalas F, Haddad Y, NolanKE,etal.5G:theconvergenceofwirelesscommunications. Wirel Pers Commun. 2015;83:1617–42.
[13] Chen M, Zhang Y, Hu L, Taleb T, Sheng Z. Cloud-based wireless network: Virtualized, reconfigurable, smart wireless network to enable 5G technologies. Mobile Netw Appl. 2015;20:704–12.
[14] Panwar N, Sharma S, Singh AK. A survey on 5G: the next generation of mobile communication. Phys Commun. 2016;18:64–84.
[15] Kanerva M, Lassila M, Gustafsson R, O'Shea G, AarikkaStenroos L, Hemila J. Emerging 5G technologies affecting markets of composite materials. Vantaa, Finland: Exel Composites; 2018.
[16] Hu F. Opportunities in 5G networks: research and development perspectivea. USA: CRC Press Florida; 2016.
[17] Hui H, Ding Y, Shi Q, Li F, Song Y, Yan J, 5G network-based Internet of Things for demand respo nse in smart grid: Asurvey on application potential, Appl. Energy. 2020; 257: 113972.
[18] Hao H, Hui D, Lau D, Material advancement in technological development for the 5G wireless communications, Nanotechnol. Rev. 2020; 9: 683–699.
[19] Patil S, Patil V, Bhat P. A review on 5G technology. Int J Eng Innov Tech. 2012;1:26–30.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

[20] Jamthe DV, Bhande SA. Nanotechnology in 5G wireless communication network–an approach. Int Res J Eng Tech. 2017;4:58–61.
[21] Rojas JP, Singh D, Inayat SB, Sevilla GT, Fahad HM, Hussain MM. Review–micro and nano-engineering enabled new generation of thermoelectric generator devices and applications. ECS J Solid State Sci Technol. 2017;6:3036–44.
[22] Green M, Chen X. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. J Materiomics. 2019;5:503–41.
[23] Park S-E, Ryoo R, Ahn W-S, Lee CW, Chang J-S. Nanotechnology in mesostructured materials: Proceedings of the 3 international materials symposium. Elsevier, Amsterdam, Netherlands: Academic Press; 2003.
[24] Shpak AP, Gorbyk PP. Nanomaterials and supramolecular structures: Physics, chemistry, and applications. Berlin, Germany: Springer; 2010.
[25] Sudo K, Onaka K, Hirose K, Hasegawa Y, Komura R, Yamada Y, Hiratsuka T, Koshino M, Hayafuji H, 28 GHz antenna-array-integrated module with built-in filters in LTCC substrate. IEEE Asia-Pacific Microwave Conference, 2019. 1041-1043.
[26] Devlin L, Person G, Pittock J, RF and microwave component development in LTCC, IMPAS Nordic 38th annual conference, 2001, 96-110.
[27] Guo G, Wu LS, Zhang YP, Mao JF, Stacked patch array in LTCC for 28 GHz antenna-in-package applications, IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium, 2017, 1-3.
[28] Outerelo DA, Alejos AV, Sanchez MG, Isasa MV, Microstrip antenna for 5G broadband communication: overview of design issues, IEEE international symposium on antennas and propagation & USNC/URSI national radio science meeting, 2015, 2443-2444.
[29] Baras T, Jacob AF, Manufacturing reliability of LTCC millimeter-wave passive components, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2008; 56: 2574-2581.
[30] Joseph N, Varghese J, Teirikangas M, Vahera T, Jantunen H, Ultra-low-temperature cofired ceramic substrates with low residual carbon for next-generation microwave applications, ACS Applied Materials & Interfaces. 2019; 11: 23798-23807.
[31] Lamminen AEI, Saily J, Vimpari AR, 60-GHz patch antennas and arrays on LTCC with embedded-cavity substrates, IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2008; 56: 2865-2874.
[32] Feng KC, Chen PY, Tu CS, Chen CS, Chien RR, Chiang CC, Chang WS, Ag diffusion inhibition and enhanced flexural strength in low temperature co-fired CaO-Al2O3-B2O3-SiO2 glasses, Journal of Alloys and Compounds 782 (2019) 1094-1102.
[33] Navias L, Green RL, Dielectric properties of glasses at ultrahigh frequencies and their relation to composition, Journal of the American Ceramic Society, 29 (1946) 267-276.
[34] Wang SH, Zhou HP, Densification and dielectric properties of CaO-B2O3-SiO2 system glass ceramic, Materials Science and Engineering B 99 (2003) 597-600.
[35] H. Zhu, H. Zhou, M. Liu, P. Wei, G. Ning, Low temperature sintering and properties of CaO–B2O3–SiO2 system glass ceramics for LTCC applications, Journal of Alloys and Compounds 482 (2009) 272-275.
[36] F. Wang, W. Zhang, X. Chen, H. Mao, Z. Liu, S. Bai, Low temperature sintering and characterization of La2O3-B2O3-CaO glass-ceramic/LaBO3 composites for LTCC application, Journal of the European Ceramic Society.2020, 40: 2382-2389.
[37] R. Müller, R. Meszaros, B. Peplinski, S. Reinsch, M. Eberstein, W.A. Schiller, J. Deubener, Dissolution of alumina, sintering, and crystallization in glass ceramic composites for LTCC, Journal of the American Ceramic Society 92 (2009) 1703-1708.
[38] B.K. Choi, E.S. Kim, Microwave dielectric properties of cordierite-diopside glass-ceramics, Journal of Electroceramics 33 (2014) 89-95.
[39] Feng KC, Chou CC, Chu LW, Chen H, Zirconia nucleating agent on microstructural and electrical properties of a CaMgSi2O6 diopside glass-ceramic for microwave dielectrics, Materials Research Bulletin. 2012; 47: 2851-2855.
[40] C.C. Chou, K.C. Feng, I.P. Raevski, H. Chen, C.Y. Tsao, P.Y. Chen, C.S. Chen, C.A. Lu, C.S. Tu, Part I: Effects of two-stage heat treatment on densification, microstructural features and dielectric properties of CaO–MgO–SiO2 glass-ceramics with ZrO2 nucleating agents, Materials Research Bulletin. 2017; 96: 66-70.
[41] Behdinan K, Moradi-Dastjerdi R, Safaei B, Qin Z, Chu F, Hui D. Graphene and CNT impact on heat transfer response of nanocomposite cylinders. Nanotechnol Rev. 2020;9:41–52.
[42] Jin R. Nanoscience and nanotechnology: where are we heading? Nanotechnol Rev. 2013;2:3–4.
[43] Wang G, Chen Q, Gao M, Yang B, Hui D. Generalized locallyexact homogenization theory for evaluation of electric conductivity and resistance of multiphase materials. Nanotechnol Rev. 2020;9:1–16.
[44] Lau KT, Hui D. The revolutionary creation of new advanced materials–carbon nanotube composites. Compos Part BEng. 2002;33:263–77.
[45] Dragoman M, Muller AA, Dragoman D, Coccetti F, Plana R. Terahertz antenna based on graphene. J Appl Phys. 2010;107:104313.
[46] Chen P-Y, Argyropoulos C, Alu A. Terahertz antenna phase shifters using integrally-gated grapheme transmission-lines. IEEE T Antenn Propag. 2013;61:1528–37.
[47] Ullah Z, Witjaksono G, Nawi I, Tansu N, Irfan KM, Junaid M. A review on the development of tunable grapheme nanoantennas for terahertz optoelectronic and plasmonic applications. Sensors. 2020;20(5):1401.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]

[48] Carrasco E, Perruisseau-Carrier J. Reflectarray antenna at terahertz using graphene. IEEE Antenn Wirel Propag Lett. 2013;12:253–6.
[49] Anand S, Sriram KD, Wu RJ, Chavali M. Graphene nanoribbon based terahertz antenna on polyimide substrate. Optik. 2014;125:5546–9.
[50] Jornet JM, Akyildiz IF. Graphene-based nano-antennas for electromagnetic nanocommunications in the terahertz band, Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 2010. p. 1–5.
[51] Han JH, Paulus GL, Maruyama R, Heller DA, Kim WJ, Barone PW, et al. Exciton antennas and concentrators from core-shell and corrugated carbon nanotube filaments of homogeneous composition. Nat Mater. 2010;9:833–9.
[52] Rutherglen C, Burke P. Carbon nanotube radio. Nano Lett. 2007;7:3296–99.
[53] LanY,ZengB,ZhangH,ChenB,YangZ.Simulationofcarbon nanotube THz antenna arrays. Int J Infrared Millim Waves. 2007;27:871–7.
[54] Demoustier S, Minoux E, Le Baillif M, Charles M, Ziaei A. Review of two microwave applications of carbon nanotubes: nano-antennas and nano-switches. C R Phys. 2008;9: 53–66.
[55] Fung CK, Xi N, Shanker B, Lai KW. Nanoresonant signal boosters for carbon nanotube based infrared detectors. Nanotechnology. 2009;20:185201.
[56] Lin X, Han Q, Huang J. Effect of defects on the motion of carbon nanotube thermal actuator. Nanotechnol Rev. 2019;8:79–89.
[57] Huang Y, Yin W-Y, Liu Q. Performance prediction of carbon nanotube bundle dipole antennas. IEEE Trans Nanotechnol. 2008;7:331–7.
[58] Lee S, Choo M, Jung S, Hong W. Optically transparent nanopatterned antennas: a review and future directions. Appl Sci. 2018;8:901.
[59] Lee H, Shaker G, Naishadham K, Song X, Mckinley M, Wagner B, et al. Carbon-nanotube loaded antenna-based ammonia gas sensor. IEEE Trans Microw Theory Technol. 2011;59:2665–73.
[60] Han Z, Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: a review. Prog Polym Sci. 2011;36(7):914–44.
[61] Kuruvilla J, Runcy W, Gejo G. Materials for potential EMI shielding applications: rocessing, properties and current trendsp. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2019.
[62] Lu M, Wang X, Cao W, Yuan J, Cao M. Carbon nanotube-CdS core-shell nanowires with tunable and high-efficiency microwave absorption at elevated temperature. Nanotechnology. 2016;27:065702.
[63] Kang J-H, Kim D-S, Seo M. Terahertz wave interaction with metallic nanostructures. Nanophotonics. 2018; 7:763–93.
[64] Derose CT, Kekatpure RD, Trotter DC, Starbuck A, Wendt JR, Yaacobi A, et al. Electronically controlled optical beamsteering by anactive phasedarray of metallicnanoantennas. Opt Mater Express. 2013; 21:5198–208.
[65] Liu N, Tang ML, Hentschel M, Giessen H, Alivisatos AP. Nanoantenna-enhanced gas sensing in a single tailored nanofocus. Nat Mater. 2011;10:631–6.
[66] Hsiao Y-C, Su C-W, Yang Z-H, Cheypesh YI, Yang J-H, Reshetnyak VY, et al. Electrically active nanoantenna array enabled by varying the molecular orientation of an interfaced liquid crystal. RSC Adv. 2016;6:84500–4.
[67] Gómez-Medina R, Yamamoto N, Nakano M, de García DAFJ. Mapping plasmons in nanoantennas via cathodoluminescence. New J Phys. 2008;10:105009.
[68] Chen H-T, Padilla WJ, Zide JMO, Gossard AC, Taylor AJ, Averitt RD. Active terahertz metamaterial devices. Nature. 2006;444:597–600.
[69] Jeong MJ, Hussain N, Park JW, Park SG, Rhee SY, Kim N. Millimeter-wave microstrip patch antenna using vertically coupled split ring metaplate for gain enhancement. Microw Opt Technol Lett. 2019;61:2360–5.
[70] Zheludev NI, Kivshar YS. From metamaterials to metadevices. Nat Mater. 2012;11:917–24.
[71] Gao XJ, Oguz O. Enhancement of gain and directivity for microstrip antenna using negative permeability metamaterial. IJCSM. 2016;45:880–5.
[72] Hong Q, Luo J, Wen C, Zhang J, Zhu Z, Qin S, et al. Hybrid metal graphene plasmonic sensor for multi-spectral sensing in both near- and mid-infrared ranges. Opt Express. 2019;27:35914–24.
[73] Chandel VS, Wang GN, Talha M. Advances in modelling and analysis of nano structures: a review. Nanotechnol Rev. 2020;9:230–58.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-09-10]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.3.63.4.3]