



*ab.shanaghi@gmail.com

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

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

ابوالفضل شانقی^{۱*}، علی شانقی^۲

^۱ دانشکده برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

^۲ گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر

چکیده: امروزه، افزایش سریع تعداد دستگاه‌های تلفن همراه، داده‌های حجمی، و نرخ داده بالاتر، توسعه ارتباطات بی‌سیم نسل پنجم (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 نانوآنتن‌ها و بسته با خواص نانو مواد و سرامیک‌های با خاصیت الکترومغناطیس و دی‌کتریک ویژه همراه با مورفولوژی نانو ساختار می‌باشد. شیشه-سرامیک‌ها برای وسایل بی‌سیم 5G سرامیکی پخت شده با دمای پایین^۱ (LTCC) خواص مایکروبوی عالی دارند، همچنین گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانومواد فلزی و فرامواد^۲ 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، نانوتیوب‌های کربن و نانو مواد فلزی در گسترش نانوآنتن‌ها و تجهیزات 5G مورد بحث قرار گرفته است.

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

۱- مقدمه

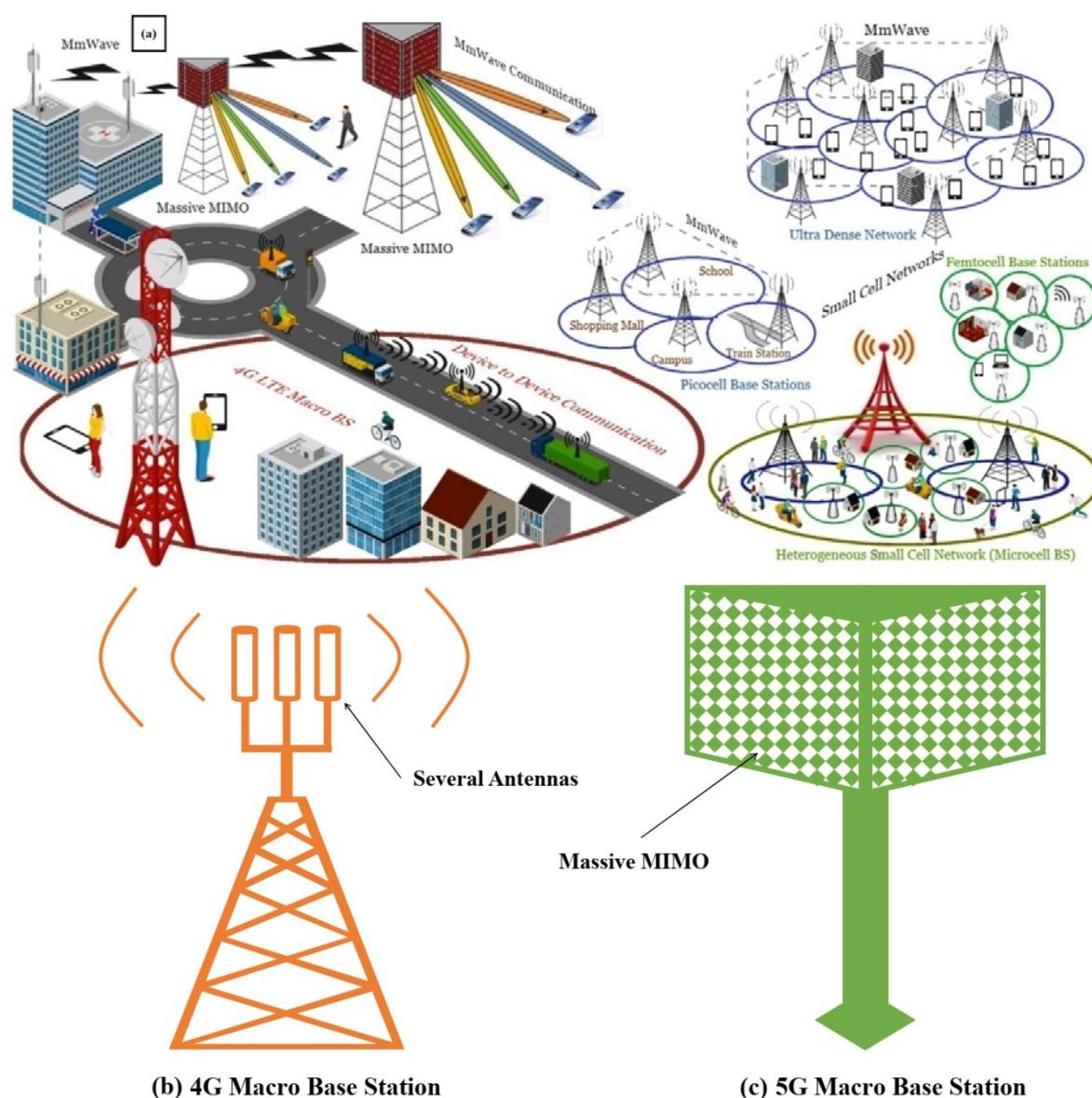
توسعه علمی و تکنولوژیکی ارتباطات بی‌سیم برای جامعه و مردم در زندگی روزمره آن‌ها سودمند است [۱-۳]. پیشرفت و تقاضا در جامعه، به نوبه خود، نوآوری و توسعه سیستم‌های ارتباطات بی‌سیم را گسترش داده است. در دهه پیش رو، استفاده و کاربردهای بسیار زیاد ارتباط‌های مخابراتی در منجر به افزایش قابل توجه ترافیک تلفن همراه بوسیله میلیاردها اتصال برای دستگاه‌های ارتباطی در مقایسه با آیچه 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 واقعیت مجازی به تدریج از طریق سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم در حال گسترش می‌باشد [۷-۸]. که با استفاده از 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 ۱۰۰ - ۳۰ 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

نانو فناوری، که مجموعه‌ای از ابزارها را برای ایجاد اجزای نانو مقیاس فراهم می‌کند، به طور گستره‌های در ارتباطات بی‌سیم 5G مورد استفاده قرار گرفته است. 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 قابل توجهی افزایش می‌دهد و برای جذب مایکروویو و تحریک اثر متقابل نور و ماده در ناحیه گیگا هرتز طیف الکترومغناطیسی به می‌توان از مواد نانوساختار جهت افزایش بازدهی استفاده نمود [۱۸-۲۲]. پاسخ الکترومغناطیسی نانومواد توسط گذردهی^۱ و نفوذپذیری^۲ تعیین می‌شود، که مرتبط با ذخیره‌سازی و اتصال ارزشی است، که به طور عمدۀ مقدار اتصال بازتاب در سطح مشترک نانو مواد – اتمسفر را تعیین می‌کند. اما بیشترین انعکاس یا اتصال امواج مکروویو 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

بنابراین خواص دی الکتریک و مغناطیسی زیرلایه‌ها و نانو ساختارهای مورد استفاده در تجهیزات ارتباطی نقش بسیار مهمی در تضعیف امواج الکترومغناطیسی 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^۱ (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 فوق العاده بالا بسیار مهم است.

در این مقاله پیشرفته‌های اخیر در زمینه کاربرد مواد نانوساختار همانند شیشه-سرامیک‌ها، گرافن، نانولوله‌های کربنی (CNT)، مواد نانو فلزی و فرآموده 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 دی الکتریک پایین (10~42 GHz) عمل می‌کنند، با توجه به کاربردهای امیدبخش خود در فن‌آوری‌های مخابراتی 5G در فرکانس‌های زیر 6 GHz و 28 GHz مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۸-۲۵]. 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 ریزموچ و چند لایه آتن/فیلتر فرکانس‌های بالا مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۳۱-۳۹].

در تحقیقات جدید از آلومینا در ساخت شیشه‌های $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ استفاده می‌شود، که در این مواد LTCC استنی، آلومینا به عنوان پرکننده دی الکتریک 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 (1~32 GHz) ایجاد می‌کند [۳۴-۳۲]. دوم، سیستم‌های شیشه-سرامیک با بلورینگی بالا، ثابت دی الکتریک پایین و عوامل با کیفیت بالا که می‌توانند با استفاده از مواد دیگر مانند $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}$ (LBC)، B_2O_3 (CSB) تلفات تائزانت کمتری را در ناحیه GHz نشان می‌دهند و ساخت دستگاه‌هایی با خواص عالی را ممکن می‌سازند [۳۸-۳۵]، 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، دی الکتریک و خواص مکانیکی به دلیل بیش از حد فاز شیشه به سرعت کاهش می‌یابد [۱۷]. تحقیقات بیانگر وجود سیستم‌ها با ثابت‌های دی الکتریک پایین (7.8 ~ 42 GHz)، فاکتورهای با کیفیت بالا ($\tan\delta \leq 0.001$) در محدوده GHz و پایداری حرارتی گستره (قابل بررسی توسط ضریب دمای صفر در فرکانس رزونانس) در شیشه-سرامیک‌های بر پایه $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (CMS) است [۳۰-۳۹].

بنابراین شیشه-سرامیک‌های با اتلاف تائزانت 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 10 GHz پایداری دمایی نیاز است و مواد بایستی دارای Q بالا و ثابت‌های دی الکتریک در محدوده ۶ تا ۱۸ GHz باشند. دوم، سرامیک‌های دارای Q فوق العاده بالا و ثابت دی الکتریک کمتر از ۳۰، که در این حالت میزان Q با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد، اما برای داشتن اتلاف تائزانتی کم مخصوصاً در فرکانس‌های بالاتر از 28 GHz نیاز به مواد با Q فوق العاده زیاد است.

¹ Molecular dynamics

² Wollastonite

³ Cordierite

⁴ Diopside

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

Material	ϵ'	$Qf > 50000$
Cordierite	4-5	112500
Eucryptite LiAlSiO_4	5.3	80000
$\text{Li}_2\text{MgSiO}_4$	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 ($\text{Sr},\text{Ba}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)	7.2	77000
Spinel (MgAl_2O_4)	8.5	105000
Alumina (Al_2O_3)	10.0	634000

۲-۲- گرافن

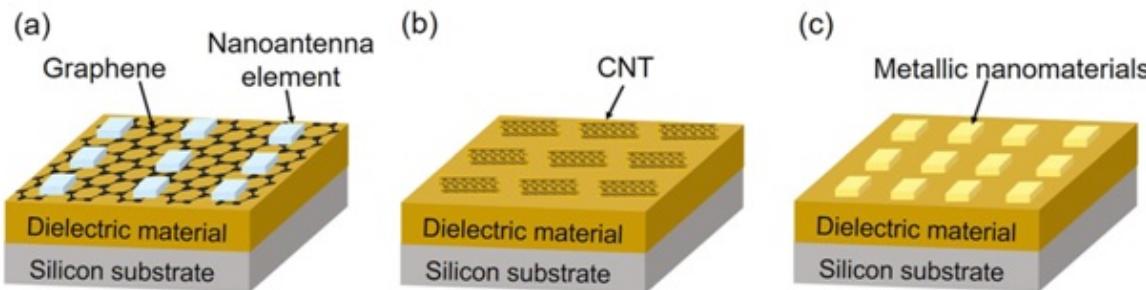
ارتباطات G5 به آتن‌هایی با ظرفیت بیشتر، طیف بی‌سیم گستردۀ تر، بهره بالا و قابلیت هدایت بیشتر در مقایسه با 4G نیاز دارد و آتن‌های معمولی به دلیل محدودیت‌های ساخت و نصب در اندازه‌های کوچک‌تر، قادر به تأمین فرکانس بالای نمی‌باشند. همچنین نانوذرات فلزی معمولاً برای ایجاد اتصال هدایتی در آتن‌ها استفاده می‌شوند، 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 می‌شود[۶۴-۶۶]. لذا استفاده از مواد نانو مرتبط با کربن مانند گرافن و نانو تیوب‌های کربن (CNTs) با اندازه‌های کوچک‌تر و ابعاد نازک‌تر که قادر به انتشار فرکانس‌های بالا می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴۴-۴۱].

گرافن دارای یک لایه منفرد از اتم‌های کربن در یک ساختار هگزاگونال است با خواص ویژه‌ای همانند جمله انتقال بار در دمای اتاق حدود $V^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^2$ $2000000 \Omega / \text{TPa}$ ، مدول یانگ $5/1$ ، استحکام شکست 125GPa ، و هدایت گرمایی $5000 \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ، آن را در گروه سفتترین مواد با بالاترین تحرك بار در نظر می‌گیرند. همچنین گرافن دارای رسانایی بالایی تا 108 S / m و مقاومت ورقه‌ای کمتر از $30 \Omega / \text{m}$ با شفاقت نوری 90% می‌باشد و به دلیل ویژگی‌های سوئیچینگ عالی و خواص قابل تنظیم، به یک ماده جذاب برای تولید نجهیزات الکترونیکی با سرعت فوق العاده بالا تبدیل شده است. بطور مثال، رسانایی یکی از مهم‌ترین خصوصیات آتن‌های مبتنی بر گرافن است که می‌تواند از طریق ولتاژ بایاس اعمالی و روش‌های دوپینگ کنترل شود [۷۵، ۷۱] و آنچنانی 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 تراهنتر، با اتلاف متوسط و میدان قوی موضعی، از امواج پلازمون پلاسمون^۱ (SPP) سطح فوق العاده 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 آتن‌ها مخابراتی، جهت ساخت آتن‌هایی با اندازه‌های کوچک‌تر و ابعاد نازک‌تر با توانایی انتشار فرکانس‌های بالا می‌باشد [۸۳، ۸۴]. در شکل ۲ شماتیک ساختار نانو آتن‌های مبتنی بر گرافن، نانو تیوب‌های کربن و نانو مواد فلزی همراه با یک لایه میانی سرامیکی دی‌الکتریک بر روی زیر لایه

^۱ Plasmon polariton

سیلیکونی به ترتیب نشان داده است. نانو آتنن های مبتنی بر گرافن از سطح تراشه کوچکتری نسبت به همتایان فلزی برخوردار هستند که می توانند در محدوده طیف وسیع فرکانسی عمل نمایند، که صدها برابر کوچکتر از آتنن های میکرواستریپ معمولی بوده و پهنای باند و بهره بیشتری نسبت به نانو آتنن های فلزی دارند و با کنترل رفتار الکتریکی و دوب کردن عناصر شیمیایی در ساختار هگزاگونال گرافن می توان سرعت های انتقال داده تا حد تراویت بر ثانیه رسید [۴۹-۵۰].



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

۳-۲- نانو تیوب های کربن (CNT)

نانو تیوب های کربن مواد تک بعدی هستند، که به دلیل خواص الکترونیکی و الکترومغناطیسی غیر معمول همانند دو قطبی های انتقالی هم محور، جذب بالای مقاطع عرضی و بازده کوانتومی بالا، به عنوان مواد نانو آتنن مورد استفاده قرار گرفته اند. هدایت الکتریکی بسیار بالا در نزدیکی حدود کوانتومی، تلفات مقاومتی در آتنن به حداقل رسانده، همچنین ساختار تقریباً بدون نقص CNT ها همنجر به کاهش قابل توجه اتلاف توان گردیده است [۵۱-۵۳]. مطابق شکل ۲b، حرکت الکترون در CNT ها ناشی از انتقال بالستیک از طریق نانولوله ها است و خواص الکتریکی نانوتیوب های کربن می توانند به دو صورت هادی و نیمه هادی باشد، که نانو تیوب های هادی فاقد انرژی باند گپ و نیمه هادی ها 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 مادون قرمز و طیف جذبی در نانولوله ها در محدوده ۱۵/۰ الکترون ولت باشد، انتظار می رود که تقریباً 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 کانال های ارتباطی موجود با استفاده از نانولوله های موازی و عمودی می شود. نانو آتنن های مبتنی بر CNT قادر به موثر بودن جریان انرژی با توجه به شدت و جهت آن از طریق کنترل مناسب طول و خواص نانوتیوب ها، گزینه ای مناسب برای مواد مورد استفاده در سیستم های مخابراتی ۵G هستند، همچنین از آنجاییکه الکترون ها در CNT ها از طریق پیوند π اتم های کربن هدایت می شوند، که در ورقه های گرافیت نازک نیز اتفاق می افتد، در فرکانس های عملیاتی بالا در محدوده تراهertz دارای کارایی قابل توجهی هستند [۵۶-۵۸].

بنابراین پایین بودن اتلاف توان نانو آتنن های مبتنی بر CNT منجر به بازدهی بالای آنها نسبت به آتنن های پایه فلزی با اندازه مشابه می گردد و هنگامی که چندین میکرو آمپر جریان را تحت ولتاژ اعمالی حمل می کند، حداکثر چند میکرو وات توان را به محیط اطراف خود منتشر می کند، که جهت افزایش محدوده ارتباطی مورد نیاز، امکان تقویت توان انتقال با استفاده از تعداد نانولوله به صورت موازی وجود دارد. اما باستی توجه داشت امپدانس بسیار بزرگ نانو تیوب های کربن در حدود $10\text{ k}\Omega / \mu\text{m}$ منجر به مشکلات عدم انتلاق نانو آتنن ها با خطوط معمولی انتقال داده ها که دارای امپدانسی در محدوده $50\text{ }\Omega / \mu\text{m}$ است، می گردد. علاوه بر خواص ذکر شده، رسانایی گرمایی بالا نانو آتنن های مبتنی بر گرافن ($5,000\text{ W/(m K)}$) و مبتنی بر CNT ($2,000\text{ W/(m K)}$)، همراه با ساختار ویژه آنها همانند مساحت سطحی بالا منجر به افزایش سرعت کاهش دما نانو آتننها و قابلیت کاربرد آنها در دمای های بالا گردیده است [۵۹-۶۱]. همچنین افزایش بیش از حد دما منجر به اکسید شدن نانوتیوب های کربن و گرافن گردیده، که اکسید گرافن نیز به دلیل جذب ماکروویو خوب در نانو آتنن ها مورد استفاده قرار گیرد [۶۱]. نانو تیوب های

کربن در دمای حدود ۷۰۰ درجه کلوین اکسید می‌شوند و بطور قابل توجهی خواص الکترومغناطیسی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. برای افزایش بازده هدایت حرارتی نانو آنتن‌های حاوی CNT ها از کامپوزیت آنها با ترکیبات سرامیکی همانند اکسید سیلیسیوم استفاده کرده، بطوریکه کامپوزیت CNT ۱۰ % 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 گذرهایی را کاهش داد [۶۱-۶۲].

۴-۲-نano 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^۱ (SPRs)، که شامل نوسان چگالی بار است، حمایت کرده، و منجر به ایجاد میدان‌های الکترومغناطیسی موضعی در فصل مشترک بین فلز و دی‌الکتریک می‌گردد. رزونانس‌های پلاسمون سطحی موضعی همراه با نوسانات الکترون‌های آزاد تجمیع شده، می‌توانند میدان بزرگی را در یک حجم بسیار کوچک ایجاد کنند [۶۳-۱۴۳]. 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^۲، کنترل قطبش^۳، بهبود شدت^۴، افزایش نرخ تاخیر^۵ و شکل‌دهی طیفی^۶ می‌باشد [۱۵۰-۱۵۲]. با این حال علاوه بر ویژگی ذاتی نانو مواد فلزی و اندازه و شکل نانو ذرات فلزی، طول موج رزونانس و شدت میدان‌های موضعی در نانوآنتن‌های فلزی وابسته به هندسه ساختاری و ضریب شکست محیط اطراف نیز می‌باشد [۶۵-۶۷].

علاوه بر ترکیبات سرامیکی، گرافن، نانوتیوب‌های کربن و ناذرات فلزی، دسته‌ای دیگری از مواد به نام فراموادها^۷، 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 گذرهای 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 گذرهای 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^۸ می‌توانند از سیم‌های نازک فلزی برای به دست آوردن مقادیر منفی گذرهای 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^۹ با مقدار تراوایی منفی می‌توانند ساختاری از تشیدیدگر 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^{۱۰} دارای ضریب شکست منفی بوده و ساختار آن‌ها ترکیبی از ساختارهای مبتنی بر سیم نازک با ساختارهای مبتنی بر تشیدیدگر حلقه‌ای است [۶۸-۶۹].

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

¹ Surface plasmon resonances

² Directivity gain

³ Polarization control

⁴ Intensity enhancements

⁵ Decay rate enhancement

⁶ Spectral shaping

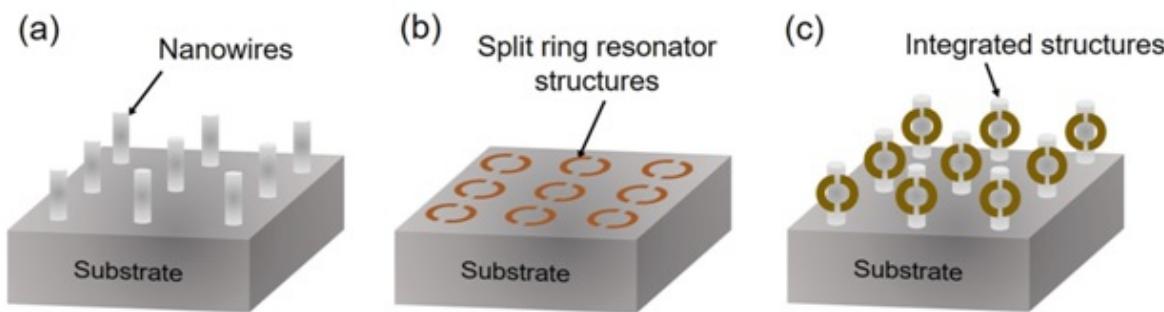
⁷ Metamaterials

⁸ Electric negative metamaterials

⁹ Magnetic negative metamaterials

¹⁰ Double-negative metamaterials

فعل و انفعالات میدان نزدیک بین آنها به دست می‌آید. استفاده از فرامواد 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 فرامواد با طراحی و ساخت ساختارهای مصنوعی و ترکیبی از سرامیک‌ها، گرافن، CNT‌ها و نانو مواد فلزی می‌توانند بر کارایی محدود کننده و محدودیت پهنای باند برای نانوآنتن‌ها غلبه کنند [۷۰-۷۱].



شکل ۳- آرایه آنتن ساخته شده از فرامواد با ساختارهای مختلف و خواص الکترومغناطیسی مختلف، (a) نانوسیم‌های فرامواد دارای مقدار گذردهی منفی و مقدار تراوایی مثبت، (b) ساختاری از تشیدیگر حلقه‌ای جدا شده، متشكل از دو حلقه فلزی هم مرکز که با یک شکاف از هم جدا شده‌اند و دارای مقدار گذردهی مشبت و مقدار نفوذپذیری منفی هستند، (c) نانوآنتن‌ها دارای یک ساختار یکپارچه از نانوسیم و تشیدی 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- سرامیک‌ها، گرافن، CNT‌ها، نانومواد فلزی و فرامواد می‌توانند برای امواج میلی‌متری و حتی فرکانس باند تراهertz 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 می‌تواند خواص پراکنشی بهتری^۱ برای ارتباط سیستم‌های 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	5,000	1,500
CNT	106–107	8 × 104	3,000	270–950
مس	5.96 × 107	32	400	130

با توجه به خواص سرامیک‌ها، گرافن، CNT‌ها 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 تراهertz 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 نانوایزارها دشوار، پر هزینه و زمان بر است، بنابراین شبیه‌سازی‌های MD را می‌توان برای طراحی نانوایزارها با خواص پیش‌بینی شده 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

جزبی دمای بالا در نانوآتن‌ها 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 CNT‌ها و گرافن رسوب داده و سپس رابطه بین خواص الکترومغناطیسی و ترکیب و ساختار نانوکامپوزیت‌ها برای افزایش بازده سیستم‌های ارتباطی 5G و 6G بینه 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 آتن‌های، نوع مواد همانند کامپوزیت‌ها، سرامیک‌ها، گرافن، CNT‌ها و مواد فلزی با ساختار نانو بوسیله نانو تکنولوژی است. بنابراین 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 در ساختن کامپوزیت‌های پایه گرافن یا CNT‌ها می‌تواند منجر به افزایش عملکرد و بازده سیستم‌های 5G و در ادامه 6G که شامل بکارگیری امواج تراهertz 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, et al. 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.

- [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 Materomics.* 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 B Eng.* 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.

- [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] Rutherford 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, Ziae 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.