

## آشنایی با ساختار و روش های سنتز نیتريد بور ماده مورد استفاده در بهبود هدايت حرارتي سيالات

مهدی صالحی راد<sup>\*</sup>، مریم کردانی، فرزانه هاشمی نصر

پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، msalehirad@nri.ac.ir

### چکیده

استفاده از افزودنی‌های نانومتری مناسب جهت بهبود و افزایش خاصیت خنک‌کاری در دستگاه‌های صنعتی می‌تواند در کاهش دمای نقطه داغ، که یکی از محدودیت‌های طراحی در آن‌ها است، مؤثر بوده و به افزایش توان نامی، کاهش ابعاد و نیز مواد مصرفی در این‌گونه تجهیزات منجر گردد. نیتريد بور هشت وجهی (h-BN) یا "گرافن سفید" یک آنالوگ ساختاری از گرافن است که در آن اتم‌های بور و نیتروژن به صورت یک در میان جایگزین اتم‌های کربن شده‌اند. این ترکیب به عنوان یک ماده عایق الکتریکی با هدایت حرارتی بالا، یک نانو افزودنی دو بعدی بی‌نظیر به سیالات انتقال دهنده حرارت در بین سایر افزودنی‌ها محسوب می‌شود. روش‌های سنتز نانو ساختارهای نیتريد بور شامل ورقه ورقه شدن مکانیکی، ورقه‌ای شدن شیمیایی، نشست بخار به روش شیمیایی، واکنش‌های جانشینی و تابش الکترونی با انرژی بالا است. در این مقاله، روش‌های سنتز این نانوساختار به طور اجمالی معرفی می‌شود.

کلمات کلیدی: نانوسیالات، نیتريد بور هشت وجهی

## ۱- مقدمه

نانوسیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار بالا در کاربرددهای صنعتی هستند. این ذرات می‌توانند از جنس نانوذرات فلزی (مس، نقره و...)، نانوذرات اکسید فلزی (اکسید آلومینیوم، اکسید مس و...)، نانوتیوب‌ها و نانوصفحات کربنی (کربن نانوتیوب، گرافن) و نانوذرات غیرفلزی (نیتريد بور و...) باشند [۱]. نانوذرات به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی حرارتی‌شان، سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پس از توزیع در سیال پایه می‌شوند. یکی از نانوساختارهایی که برای این منظور استفاده می‌شود، نیتريد بور است. در ادامه به معرفی این ساختار و روش‌های سنتز آن پرداخته می‌شود.

## ۲- ساختارهای کریستالی و مورفولوژی‌های مختلف نیتريد بور

نیتريد بور یک ترکیب شیمیایی متشکل از تعداد مساوی از اتم‌های بور (B) و نیتروژن (N) است. این ترکیب در طبیعت یافت نشده و در نتیجه به صورت شیمیایی از بور، بورونیک اسید ( $H_3BO_3$ ) یا تری اکسید بور ( $B_2O_3$ ) تهیه می‌گردد. برای اولین مرتبه، سنتز نیتريد بور در سال ۱۸۴۲ به وسیله‌ی بالمین<sup>۲</sup> و همکاران با استفاده از واکنش بین  $H_3BO_3$  مذاب و پتاسیم سیانید (KCN) صورت پذیرفت [۲]. تا اوایل سال‌های ۱۹۶۰، پایدار کردن این ترکیب به حالت پودر و اشکال فشرده شده با حرارت، امکان‌پذیر نبود. با این حال، فناوری فرآیندپذیری نوین، نیتريد بور را به عنوان یک ماده پیشرفته و مقرون به صرفه از لحاظ اقتصادی و قابل استفاده به صورت‌های مختلف، تبدیل کرد. شکل ۱ مورفولوژی‌های مختلف نیتريد بور را نشان می‌دهد. نیتريد بور شباهت ساختاری به کربن (C) داشته و به فرم‌های کریستالی مختلف ظاهر می‌شود. فرم هشت‌وجهی (h-BN) آن به صورت پودر سفید با ساختار لایه لایه با مورفولوژی‌های مختلف و با ساختار مشابه با گرافن وجود دارد. ساختار لایه‌ای همچنین می‌تواند به فرم لوزوجهی (r-BN) وجود داشته باشد. از دیگر ساختارهای متداول نیتريد بور، فرم مکعبی (c-BN) بوده که شباهت به الماس داشته و تا به امروز به عنوان دومین ماده سخت شناخته شده است. در نهایت، فرم ورتزیت (w-BN) که مشابه لانسدالیتاست، با فراوانی بسیار کم نسبت به سایر فرم‌ها وجود دارد. در دو ساختار مکعبی و ورتزیت، پیوند بین دو اتم بور و نیتروژن به صورت  $sp^3$  و در حالت‌های هشت‌وجهی و لوزوجهی از نوع  $sp^2$  است [۳].

پس از پیدایش کربن نانوتیوب، مطالعات تجربی و تئوری روی نانوساختارها بر پایه شبکه‌های لانه زنبوری افزایش یافت. نیتريد بور لایه‌ای (h-BN) یکی از این مواد است. سنتز موفق نانوتیوب‌های خالص نیتريد بور برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ [۴] گزارش شد. در ادامه، سایر نانومواد تک بعدی مانند نانوسیم‌ها، نانوالیاف و نانومیله‌ها سنتز شدند. همچنین، با الهام از ساختارهای کروی  $C_{60}$ ، اولین تجربه در جهت تهیه ساختار آشیانه‌ای بدون بعد و فولرین نیتريد بور هشت‌وجهی در سال ۱۹۹۸ حاصل شد [۵]. پس از آن، در سال ۲۰۰۴، با شناخت بیشتر گرافن و افزایش رویکرد مطالعات روی نانوصفحات تک و چند لایه گرافیت، توجه و کنجکاوی در مورد وجود و پایداری ساختار مشابه آن یعنی نیتريد بور دو بعدی، افزایش یافت [۶]. در ادامه، نانوصفحات و نانوریون‌های h-BN (نانوصفحات با طول متغیر و

عرض باریک) تولید شدند. شکل ۲، مدل‌های بدون بعد، تک بعد و دو بعدی نانوساختارهای نیتريد بور را نمایش می‌دهد.

یک لایه از h-BN همانند یک لایه از گرافن است که در آن اتم‌های کربن به طور کامل با اتم‌های بور و نیتروژن به صورت یک در میان جایگزین شده‌اند. همانند گرافن، در هر لایه از h-BN، اتم‌ها با پیوندهای کوالانسی قوی متصل شده، درحالی‌که نیروهای ضعیف واندروالسی در بین لایه‌ها وجود دارد. پارامترهای کریستالوگرافی h-BN و گرافیت تقریباً برابر است (جدول ۱).

بر خلاف گرافن، تک لایه‌ها برای نیتريد بور به‌ندرت مشاهده شده است که به دلیل ویژگی انباشتگی خاص این ترکیب است. بر پایه شبیه‌سازی دینامیک مولکولی، اگر در یک صفحه مجزا از h-BN، دو اتم مجاور بور و نیتروژن جابه‌جا شوند (دو پیوند B-B و دو پیوند N-N به وجود می‌آید)، انرژی محاسبه شده مصرفی جهت ایجاد نقص ساختاری برابر با  $7/1 \text{ eV}$  پس از آسایش اتمی خواهد بود. همچنین، به دلیل تفاوت در الکترون‌گاتیوی اتم‌های بور و نیتروژن، پیوندهای B-N (برخلاف پیوندهای C-C در گرافیت) به صورت جزئی قطبی هستند. این عوامل سبب ایجاد برهم‌کنش‌های لب به لب بین لایه‌های همسایه در نانوساختارهای نیتريد بور می‌شود. از این‌رو، تشکیل نیتريد بور چند لایه، سبب پایداری کل سیستم خواهد شد [۷]. علاوه بر آن، بر طبق مطالعات انجام شده، پیوندهای B-N کوالانسی درون لایه‌ای به‌طور هم‌زمان در طول دو لایه نیتريد بور مجاور هم تشکیل شده و سبب ایجاد ساختار تک لایه تاخورد می‌شود. به صورت تجربی، نتایج حاصل از میکروسکوپ انتقال الکترون (TEM) نشان می‌دهد که در نانوصفحات چند لایه، فاصله بین لایه‌ای برابر با  $0/33-0/34 \text{ nm}$  بوده که مشخصه فاصله بین صفحه‌ای در سطوح (۰۰۲) h-BN است. شکل (a) ۳، تصویر TEM نانوصفحات h-BN ورقه‌ای شده با استفاده از مخلوط  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ،  $\text{KMNO}_4$  و  $\text{H}_2\text{O}_2$  را نشان می‌دهد [۸]. بر طبق شکل، شبکه به‌هم فشرده و متراکم نیتريد بور متشکل از نانوصفحات بسیار نازکی که تقریباً نسبت به پرتو الکترونی شفاف هستند، مشاهده می‌شود. علاوه بر آن، خمش ذاتی و پیچش صفحات نیز در تصویر دیده می‌شود. معمولاً قسمت‌های تاریک مربوط به برش عرضی نانوصفحات تاخورد است. شکل (b) ۳، تصویر TEM با کیفیت بالا (HRTEM) برای نانوصفحات نیتريد بور را نشان می‌دهد که در آن اثر انگشت شبکه با فاصله بین لایه‌ای  $0/33 \text{ nm}$  قابل مشاهده است. بخش الحاقی شکل (b) ۳ نشان دهنده الگوهای پراش الکترون<sup>۳</sup> (ED) نانوصفحات نیتريد بور است. الگوی شش گوشه‌ای در شکل مذکور، تقارن شش ضلعی را در آرایش اتم‌های بور و نیتروژن آشکار می‌سازد.

### ۳- روش‌های سنتز نانوساختارهای نیتريد بور

روش‌های متعددی جهت سنتز نانوساختارهای نیتريد بور دوبعدی مورد استفاده قرار گرفته است. در این قسمت، این روش‌ها مورد بحث قرار خواهند گرفت.

### ۳-۱- ورقه ورقه‌ای شدن مکانیکی

تکنیک جداسازی صفحات نیتريد بور به روش مکانیکی، از اولین روش‌های مورد استفاده در این زمینه محسوب می‌شود و با نام‌های دیگری نظیر پوسته پوسته شدن مکانیکی یا گسستگی (شکافتن) مکانیکی نیز شناخته شده است. در این روش، لایه‌های نیتريد بور قرار گرفته روی لایه  $\text{Si/SiO}_2$ ، به وسیله یک نوارچسب، پوسته پوسته شده که به وسیله میکروسکوپ نوری ساده قابل تشخیص است. نانوصفحات تهیه شده با این روش، دارای ضخامت و اندازه مطلوبی بوده و جهت کاربرد در مطالعات مختلف مناسب هستند [۹]. با این وجود، برخلاف گرافن، این روش در تمیز دادن و جداسازی تک لایه‌ای یا چندلایه‌ای با تعداد لایه‌های اندک ناموفق عمل کرده است. این امر اندکی مربوط به برهم‌کنش‌های قوی لب به لب بین صفحات نیتريد بور (تشکیل پیوند شیمیایی به عنوان پل بین اتم‌های لایه‌های مجاور هم) است. در واقع انرژی سیستم از طریق کاهش پیوندهای آزاد در لبه‌ها و افزایش پل‌ها، کاهش می‌یابد؛ بنابراین، تشکیل نیتريد بور چند لایه‌ای سبب پایداری کل سیستم می‌شود. روش دیگر در فرآیند ورقه‌ای شدن مکانیکی، به کارگیری نیروهای برشی به جای استفاده از نیروهای کششی مستقیم (پوسته پوسته کردن) است. در واقع، در طی روش پوسته پوسته کردن، نیروهای کششی منجر به شکست آسان نیروهای ضعیف واندوالسی بین لایه‌های مجاور شده و ساختار داخل صفحه‌ای با هیبریداسیون اتمی  $\text{sp}^2$  را دست نخورده نگه می‌دارد. یک نیروی برشی می‌تواند اثر مشابهی داشته باشد. در سال‌های اخیر فرآیند ملایم آسیاب کردن ساچمه‌ای مرطوب برای تولید نانوصفحات نیتريد بور از پودر آن، به روش نیروهای برشی ملایم و تحت اتمسفر نیتروژن، مورد استفاده قرار گرفته است [۱۰].

### ۳-۲- ورقه‌ای شدن شیمیایی

تهیه نانوصفحات تک لایه‌ای یا چند لایه‌ای با تعداد لایه‌های اندک از نیتريد بور کریستالی به کمک روش مشتق شده از روش محلول شیمیایی برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ انجام پذیرفت [۱۱]. در راستای افزایش در تشکیل نانوصفحات ورقه‌ای شده نیتريد بور، حلال‌های مختلفی در این زمینه به کار می‌رود. برای مثال، حلال بسیار قطبی N، N-دی متیل فرمامید (DMF) جهت تسهیل ورقه‌ای شدن به دلیل برهم‌کنش‌های قوی بین DMF قطبی و سطح نیتريد بور مورد استفاده قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که اغلب نانوصفحات حاصل شده ضخامتی بین ۱۰-۲۰ nm از خود نشان دادند. همچنین، نانوصفحات مذکور قابلیت پخش مناسب در حلال‌هایی نظیر کلروفرم و DMF از خود نشان دادند. در روشی دیگر، می‌توان پودر نیتريد بور را با یک باز لوئیس عامل دار نمود. بازهای لوئیس، مانند مولکول‌های آمین با زنجیره‌های بلند آب گریز یا آب دوست قادر به تشکیل کمپلکس با اتم‌های بور با اوربیتال خالی هستند [۱۲]. تشکیل چنین کمپلکسی سبب تسهیل ورقه‌ای شدن ساختار لایه‌ای نیتريد بور می‌شود (شکل ۴). همچنین، از متان سولفونیک اسید (MSA) نیز برای جداسازی لایه‌های نیتريد بور استفاده شده است [۱۳]. دافعه ایجاد شده بین لایه‌ها که ناشی از پروتونه شدن در لبه و سطح نانوصفحات است، سبب ورقه‌ای شدن نانوصفحات می‌شود. اخیراً، هیدروکسیدهای مذاب نظیر هیدروکسید سدیم (NaOH) و هیدروکسید پتاسیم (KOH) جهت تأمین هدف مذکور به کار

برده شدند. در نتیجه‌ی آن، نانوصفحات پیچ خورده نیتريد بور در لبه‌ها به دليل جذب کاتیون‌های  $\text{Na}^+$  یا  $\text{K}^+$  روی نقاط انتهایی سطح نیتريد بور و ورود آنیون‌ها و کاتیون‌ها به فضای بین لایه‌ها و جذب آنیون‌ها ( $\text{OH}^-$ ) روی سطح خمیده شده مثبت که سبب پیچ خوردگی ادامه‌دار لایه نیتريد بور می‌شود، تهیه شدند [۱۴].

### ۳-۳- نشست بخار به روش شیمیایی (CVD)

#### ۳-۳-۱- رشد همبافته و غیر همبافته تک لایه‌های نیتريد بور

روش‌های نشست برای چند دهه جهت رشد همبافته فیلم‌های نازک نیتريد بور به کار برده شده است. برای مثال، تخریب حرارتی و واکنش آمونیاک با تری کلرید بور ( $\text{BCl}_3$ ) در دمای  $2300-1450^\circ\text{C}$ ، سبب نشست روکش نیتريد بور روی سطح مورد نظر شد. همچنین، آمونیاک و دی بوران ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) به عنوان پیش ماده برای نشست فیلم‌های نازک نیتريد بور آمورف (ضخامت کمتر از  $600\text{nm}$ ) روی سطوح سیلیکون (Si) یا فلزی مانند تانتالوم (Ta)، مولیبدن (Mo) و ژرمانیوم (Ge) در گستره دمایی  $1000-600^\circ\text{C}$ ، مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. در حال حاضر، رشد همبافته فیلم‌های نازک نیتريد بور، شامل به‌کارگیری پیش ماده‌های شیمیایی مختلف مانند  $\text{B}_2\text{H}_6$ ،  $\text{BCl}_3\text{-NH}_3$ ،  $\text{BF}_3\text{-NH}_3$ ،  $\text{NH}_3$  و یا پیرولیز تک پیش ماده‌ها نظیر بورازین ( $\text{B}_3\text{N}_3\text{H}_6$ )، تری کلروبورازین ( $\text{B}_3\text{N}_3\text{H}_3\text{Cl}_3$ ) یا هگزاکلروبورازین ( $\text{B}_3\text{N}_3\text{Cl}_6$ ) است. یکی از سطوح فلزی جهت تهیه تک لایه h-BN مطلوب که مطالعات زیادی روی آن انجام شده، Ni (۱۱۱) است.

سیستم‌های متعددی جهت انجام CVD به صورت غیرهمبافته برای تهیه نانوساختارهای دوبعدی نیتريد بور گزارش شده است. در بیشتر حالت‌ها، لایه‌های نیتريد بور روی سطح رشد می‌کنند؛ با این وجود، تعدادی از روش‌های بدون استفاده از سطح نیز وجود دارد. در روش نشست بخار شیمیایی حرارتی با استفاده از پیش ماده‌های جامد (پودرهای B، MgO و FeO) و حرارت‌دهی تا دمای  $1300-1000^\circ\text{C}$  در یک کوره تیوبی افقی تحت جریان  $\text{NH}_3$ ، نانوصفحات رشد یافته در جهت عمودی روی سطح  $\text{Si/SiO}_2$ ، با اندازه و مورفولوژی‌های مختلف (وابسته به دمای سنتز) به دست خواهند آمد [۱۶]. مورفولوژی نانوپولک‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. بر طبق شکل، با افزایش دما از  $1000^\circ\text{C}$  به  $1200^\circ\text{C}$ ، نانوصفحات در عرض بیشتر رشد کرده و در دمای  $1300^\circ\text{C}$  شاخه‌دار شدن نانوصفحات روی سطح سبب تشکیل ساختار سه‌بعدی خاصی می‌شود. ضخامت لایه‌ها عموماً کمتر از  $4\text{nm}$  بوده و نانوصفحات رشد یافته در دماهای بالاتر، کریستالینیتته بهتری از خود نشان می‌دهند.

#### ۳-۴- واکنش‌های جانشینی

در یک واکنش جانشینی، یک اتم یا یک گروه عاملی در ترکیبی شیمیایی با اتم یا گروهی دیگر جایگزین می‌شود. در برخی از مطالعات، پودر  $\text{B}_2\text{O}_3$  در بوتله گرافیتی باز قرار گرفته و با اکسید مولیبدن ( $\text{MoO}_3$ ) به عنوان عامل پیش برنده، و سپس با صفحات گرافن پوشش داده شد. بوتله برای ۳۰ دقیقه و در دمای  $1650^\circ\text{C}$  در معرض جریان  $\text{N}_2$  قرار گرفت. پس از آن، محصول از بستر صفحات گرافنی جمع‌آوری شده و در جریان هوا به مدت ۳۰ دقیقه تا دمای

۶۵۰°C حرارت داده شد تا لایه‌های کربنی باقی‌مانده حذف شده و نیتريد بور خالص به دست آید [۱۷].

### ۳-۵- تابش الکترونی با انرژی بالا

تولید تک لایه‌های نیتريد بور با تابش الکترونی پرتوان کنترل شده با استفاده از فرآیند کاتد پرانی لایه به لایه درون دستگاه TEM قابل دستیابی خواهد بود. در ابتدا، نانوپولک‌ها و پودرهای نیتريد بور تحت شکست مکانیکی قرار می‌گیرد تا صفحات نیتريد بور با تعداد لایه‌های کاهش یافته به دست آید. سپس، لایه‌ها در جهت تشکیل لایه‌های نازک‌تر و تک لایه، تحت تابش پرتو الکترونی شدید قرار می‌گیرد. در این فرآیند، پرتو الکترون تابشی با قطر نانومتری کوچک، روی نمونه متمرکز شده و شدت پرتو روی مقدار بالا تنظیم می‌شود [۱۸].

### نتیجه‌گیری

استفاده از نانوصفحات دو بعدی h-BN در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده و مطالعات گسترده‌ای روی آن صورت پذیرفته است. این ترکیب به دلیل خواص بی‌نظیری، مانند هدایت حرارتی بالا و عایق بودن الکتریکی، قابلیت کاربرد در راستای بهبود خنک‌کاری در صنایع و فن‌آوری‌های در حال توسعه نظیر سیالات، الکترونیک، ارتباطات و دستگاه‌های صنعتی را خواهد داشت. این ترکیب، یک آنالوگ ساختاری از گرافن با فضای بین لایه‌ای  $0.333 \text{ nm}$  با قابلیت تشکیل ساختار یک بعدی و دو بعدی مشابه کربن نانوتیوب و گرافن است. اگرچه h-BN قدرت مکانیکی و هدایت حرارتی مشابه گرافن دارد، ولی با دارا بودن یک شکاف باند انرژی زیاد، این ترکیب به عایق الکتریکی تبدیل شده است.

### منابع

- [1] K. Jin Lee, S. Yoon, J. Jang, *Small*, 3 (2007) 1209-1213.
- [2] W. Balmain, *Philosophical Magazine Series 3*, 21 (1842) 270-277.
- [3] K. Watanabe, T. Taniguchi, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 8 (2011) 977-989.
- [4] N. Chopra, R. Luyken, K. Cherrey, V. Crespi, M. Cohen, S. Louie, A. Zettl, *Science*, 269 (1995) 966-967.
- [5] D. Golberg, Y. Bando, O. Stephan, K. Kurashima, *Applied physics letters*, 73 (1998) 2441-2443.
- [6] D. Golberg, Y. Bando, Y. Huang, T. Terao, M. Mitome, C. Tang, C. Zhi, *ACS Nano*, 4 (2010) 2979-2993.
- [7] C. Zhi, Y. Bando, C. Tang, H. Kuwahara, D. Golberg, *Advanced Materials*, 21 (2009) 2889-2893.
- [8] M. Du, Y. Wu, X. Hao, *Cryst Eng Comm*, 15 (2013) 1782-1786.
- [9] R. Gorbachev, I. Riaz, R. Nair, R. Jalil, L. Britnell, B. Belle, E. Hill, K. Novoselov, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Geim, P. Blake, *Small*, 7 (2011) 465-468.
- [10] Y. Yao, Z. Lin, Z. Li, X. Song, K. Moona, C. Wong, *Journal of Materials Chemistry*, 22 (2012) 13494-13499.
- [11] W. Han, L. Wu, Y. Zhu, K. Watanabe, T. Taniguchi, *Applied Physics Letters*, 93 (2008)

223103-3.

[12] Y. Lin, J. W. Connell, Pub. No.: US 201110045223 A1, 2011.

[13] Y. Wang, Z. Shi, J. Yin, Boron Nitride Nanosheets: Journal of Material Chemistry, 21 (2011) 11371-11377.

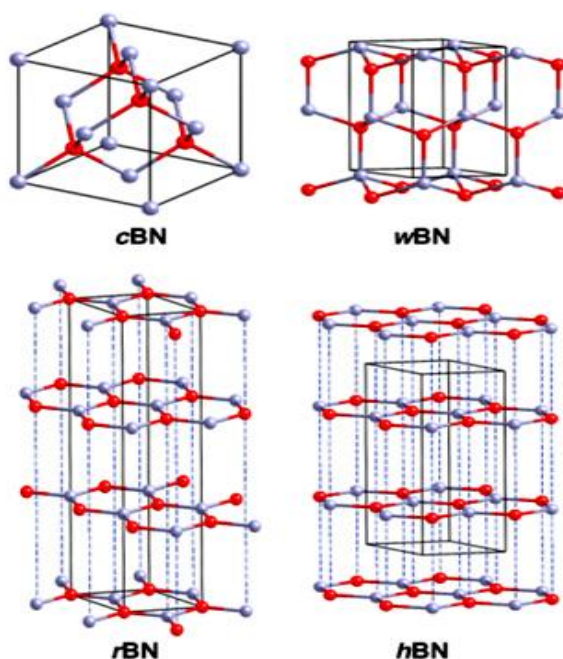
[14] X. Li, X. Hao, M. Zhao, Y. Wu, J. Yang, Y. Tian, G. Qian, Advanced Materials, 25 (2013) 220-2204.

[15] M. Rand and J. Roberts, Journal of Electrochemical Society, 115 (1968) 423-429.

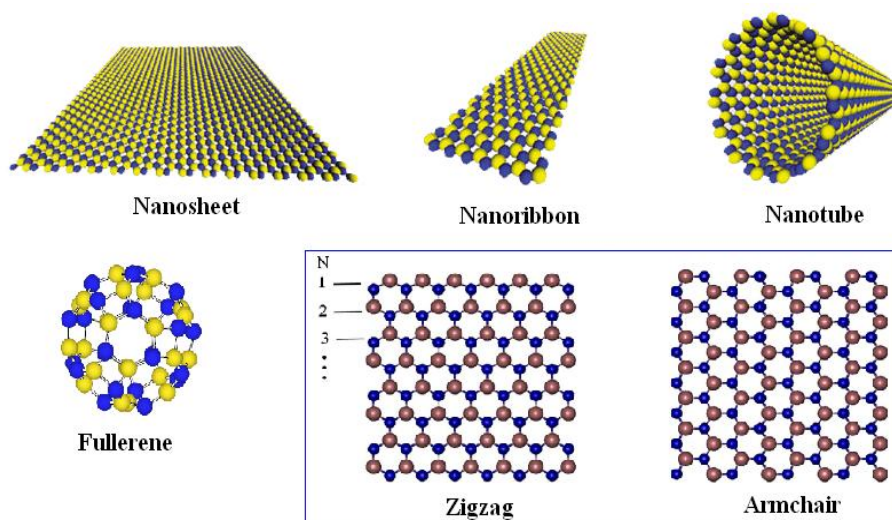
[16] A. Pakdel, C. Zhi, Y. Bando, T. Nakayama, D. Golberg, ACS Nano, 5 (2011) 6507-6515.

[17] W. Han, H. Yu, Z. Liu, Applied Physics Letters, 98 (2011) 203112-3.

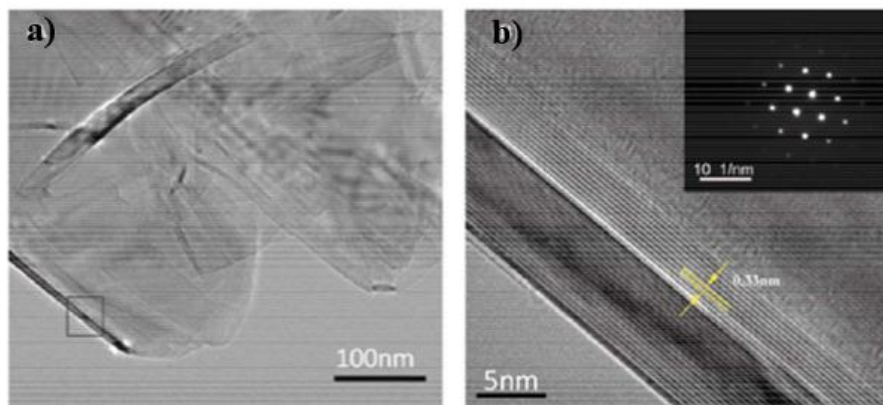
[18] J. C. Meyer, A. Chuvilin, G. Algara-Siller, J. Biskupek, U. Kaiser, Nano letters, 9 (2009) 2683-2689.



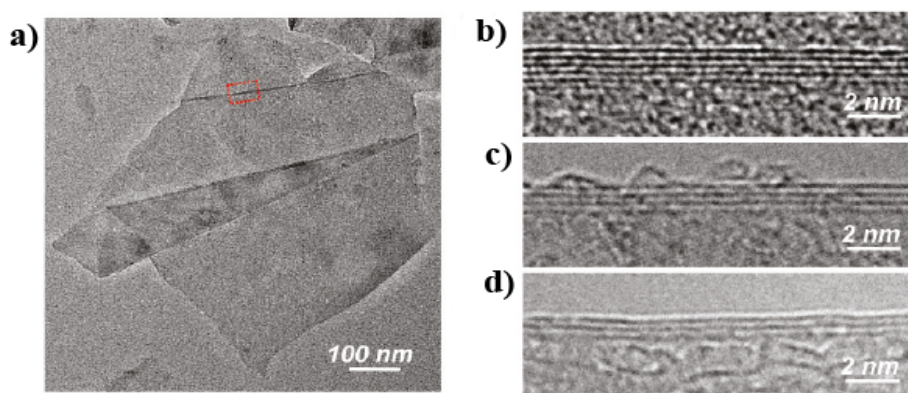
شکل ۱. طرحی از انواع ساختارهای کریستالی نیتريد بور. دایره‌های قرمز و بنفش به ترتیب موقعیت اتم‌های بور و نیتروژن و اشکال با خطوط سیاه سلول واحد را نشان می‌دهند. خطوط نقطه‌چین عمودی آبی موقعیت نسبی اتم‌ها را در هر لایه مشخص می‌کنند [۳].



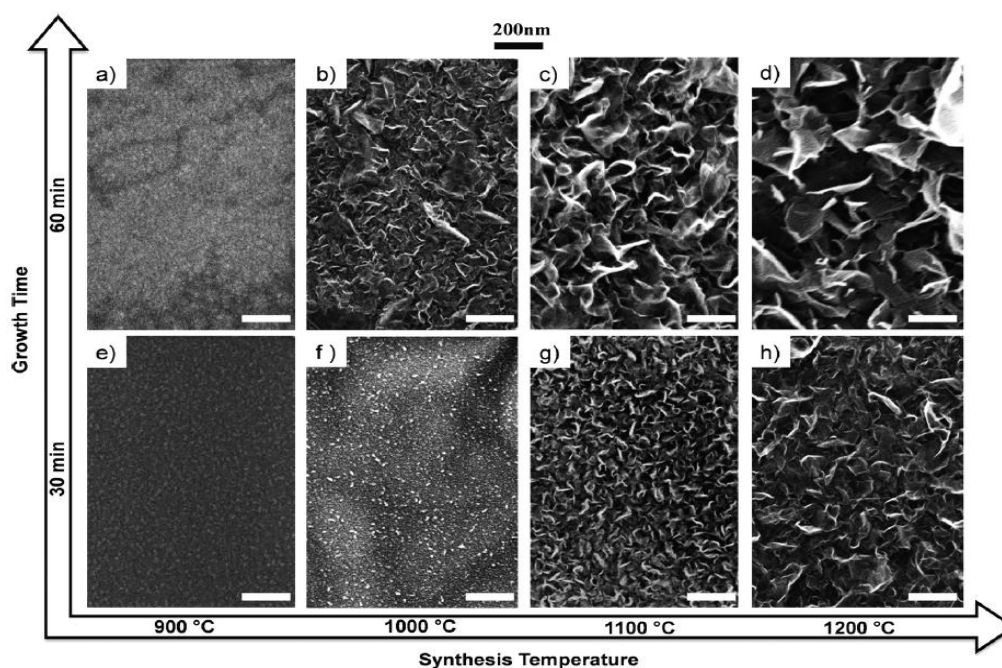
شکل ۲. مدل‌های ساختاری بدون بعد، تک بعد و دو بعدی نانوساختارهای نیتريد بور.



شکل ۳. (a) تصویر TEM نانوصفحات نیتريد بور و (b) تصویر HRTEM نانوصفحات که تاخوردگی در لبه‌ها را نشان می‌دهد. بخش الحاقی، تصویر شبکه ساختار شش گوشه‌ای نیتريد بور است [۸].



شکل ۴. (a) تصویر TEM یک نانوصفحه h-BN اصلاح شده با زنجیره پلیمری پلی اتیلن گلیکول؛ (b) تصویر HRTEM بخش قرمز مشخص شده در (a)؛ (c و d) تصاویر HRTEM نانوصفحات با لبه‌های تاخورده [۱۲].



شکل ۵. تصاویر SEM رشد غیرهمبافته نانوپولک‌های نیتريد بور جهت یافته جزئی به صورت عمودی روی سطح Si در دماهای مختلف به مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه [۱۶].



جدول ۱. اطلاعات کریستالوگرافی h-BN و گرافیت.				
ماده	ساختار کریستالی	فاصله نزدیکترین اتم همسایه (nm)	پارامترهای شبکه (nm)	فاصله بین صفحه‌ای (nm)
نیتريد بور هشت وجهی	هشت وجهی	۰/۱۴۴	a: ۰/۲۵۰ c: ۰/۶۶۶	۰/۳۳۳
گرافیت	هشت وجهی	۰/۱۴۲	a: ۰/۲۴۶ c: ۰/۶۷۰	۰/۳۳۵

### پی نوشت

<sup>1</sup>Hexagonal Boron Nitride

<sup>2</sup>Balmain

<sup>3</sup>Electron Diffraction