ГРАФЕН ЖӘНЕ ГРАФЕН НЕГІЗДІ СОРБЕНТТЕР

Дәріс 7

Графен және графен негізді сорбенттер

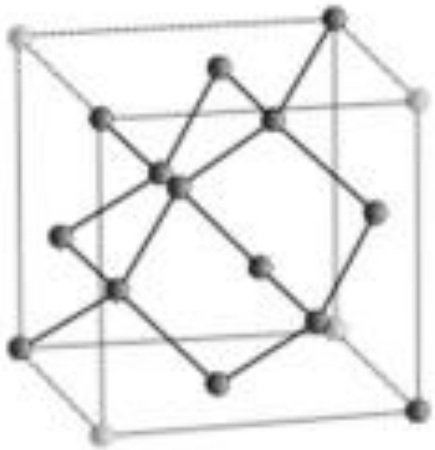
Графен — бірқабатты, екіөлшемді (2D) көміртекті материал. Ол ерекше қасиеттерімен сипатталады және алғаш рет 2004 жылы Манчестер университетінде Андре Гейм мен Константин Новоселовтың зерттеу тобы тарапынан бөлініп алынған.

Көміртекті нанокұрылымдар өлшемдеріне қарай 0D фуллерендерге, 1D көміртекті нанотүтікшелерге, 2D графенге және 3D графит пен алмазға бөлінеді. Олардың қолданылуы атомдық құрылымымен және физикалық-химиялық қасиеттерімен тығыз байланысты.

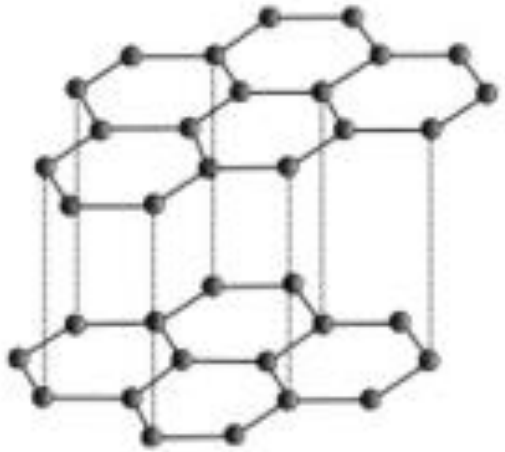
Негізгі қолданылу салалары: озық материалдар, энергияны сақтау, медицина және электроника. Графен дәрілік заттарды жеткізу жүйелерінде, биосенсорларда, портативті диагностикалық құрылғыларда, жоғары өнімді аккумуляторларда, сенсорларда, транзисторларда және икемді дисплейлерде қолданылады.

Қоршаған ортаны қорғау: графен мен оның туындыларының экологиялық қолданылу аясы зерттеулер мен инвестициялардың артуына байланысты айтарлықтай кеңейді.

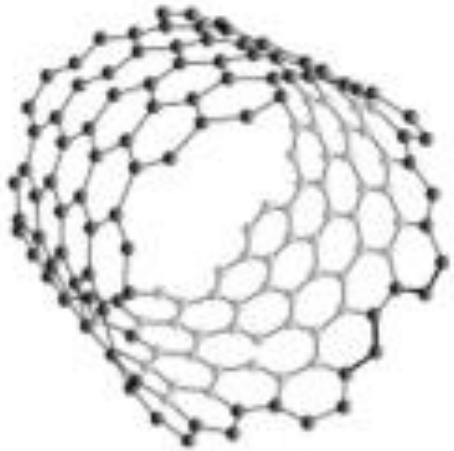
Суды ластаушы заттардан тазарту: соңғы онжылдықта осы бағыттағы ғылыми жарияланымдар саны қарқынды өсті, сондай-ақ ластаушы заттарды жоюға арналған графен негізіндегі және функционалдандырылған материалдардың түрлері кеңейді.



(a)



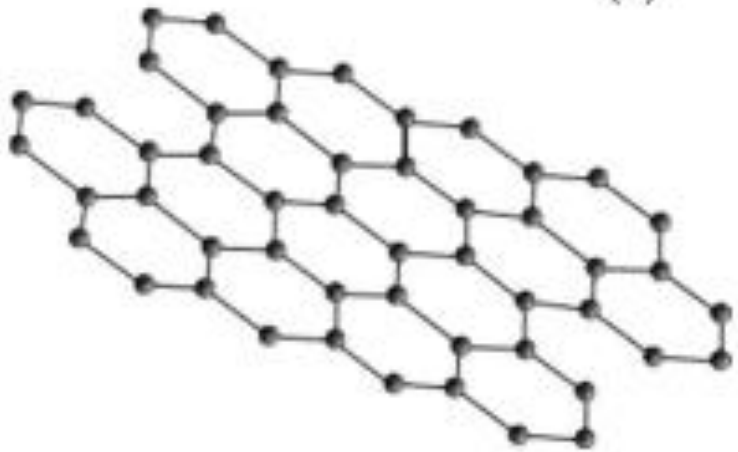
(b)



(c)



(d)



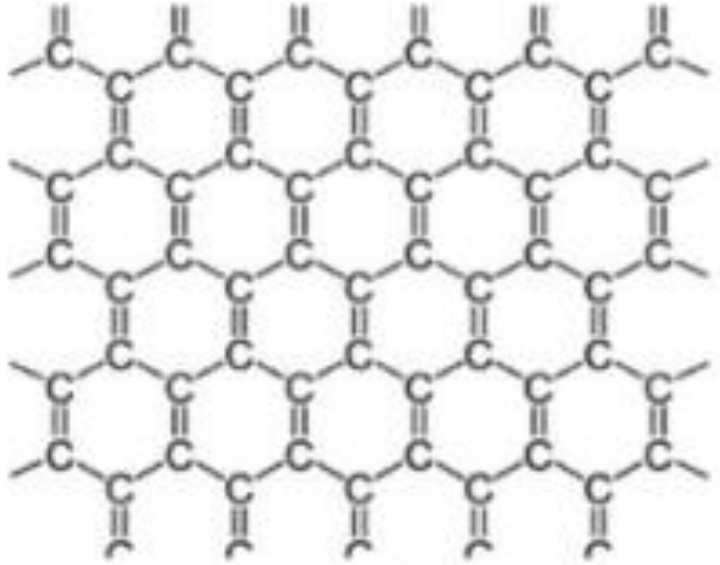
(e)

Графеннің қысқаша тарихи даму кезеңдері

•**1859 ж.** — Бенджамин Коллинз Броди термиялық тотықсыздандырылған графит оксидінің қабатты құрылымын анықтады.
•**1916 ж.** — Дебай мен Шеррер графиттің атомдық құрылымын зерттеу үшін рентгендік дифракция әдісін қолданды.
•**1947 ж.** — физик П. Р. Уоллес графиттің энергетикалық зоналық құрылымын теориялық тұрғыдан сипаттады.
•**1962 ж.** — Бём бірнеше қабатты графитті алу туралы хабарлады.
•**XX ғасырдың екінші жартысы** — графенге ғылыми қызығушылық артып, оны алу әдістері зерттеле бастады. Теориялық және эксперименттік зерттеулер графеннің тұрақтылығына қатысты мәселелерді қарастырды.
•**2004 ж.** — Андре Гейм мен Константин Новоселов Манчестер университетінде графенді бөліп алды.
•**2008–2009 жж.** — графен сиясы, мөлдір электродтар әзірленіп, жұқа қабықшалы транзисторлар мен электрохимиялық сенсорларды жетілдіруде қолданыла бастады.
•**2010 ж.** — графенді зерттегені үшін Андре Гейм мен Константин Новоселов физика бойынша Нобель сыйлығын алды.
•**2012–2017 жж.** — графен негізіндегі фотодетекторлар, аккумуляторлар, магнит өрісі сенсорлары, күн элементтері және жаңартылатын энергетикаға арналған технологиялар дамыды.
Қазіргі маңызы: графеннің электрлік, жылулық және механикалық қасиеттері оны ғылым мен технологияның көптеген салаларында қолдануға мүмкіндік береді. Қазіргі уақытта графен композиттік материалдар құрамына енгізіліп, суды, топырақты және ауаны ластаушы заттардан тазарту бағытында зерттелуде.

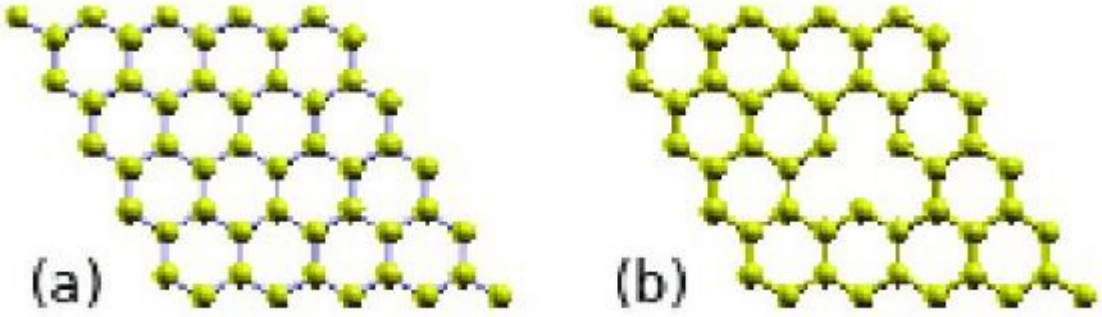
Графен негізіндегі материалдар/адсорбенттер

Графеннің ерекше қасиеттері ғалымдарды оны нақты қолдану салаларына бейімдеуге итермеледі, нәтижесінде графен негізіндегі материалдардың алуан түрлілігі пайда болды.



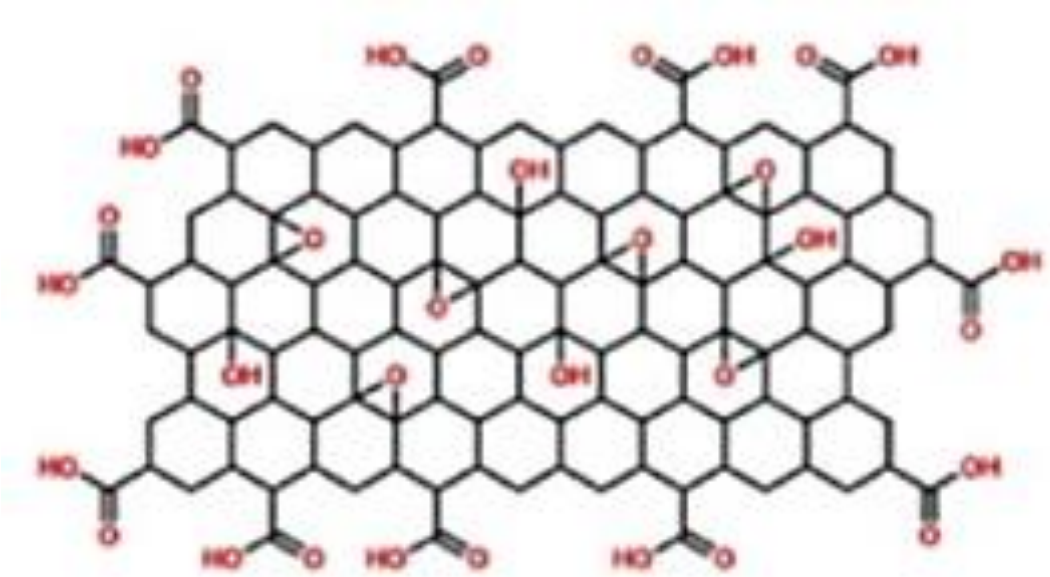
1. Графен (таза күйіндегі)

Таза графен – қазіргі уақытта қолданылатын графен адсорбентінің негізгі түрі. Ол алтыбұрышты атомдық құрылымда орналасқан көміртек атомдарының бір қабатынан тұрады; бұл құрылым болаттан жоғары беріктікке және өте жақсы жылу мен электр өткізгіштік қасиеттеріне ие. Оны үлкен жұқа қабықшалар түрінде алу әлі де қиын әрі қымбатқа түсетініне қарамастан, графеннің таза түрі жоғары технологиялық электрондық құрылғыларда және әртүрлі композиттік материалдарда маңызды қолданысқа ие. Оны өндіру процесіндегі шешуші сәт – тамаша қасиеттерін сақтайтын жоғары тазалықтағы соңғы өнімді алу болып табылады.



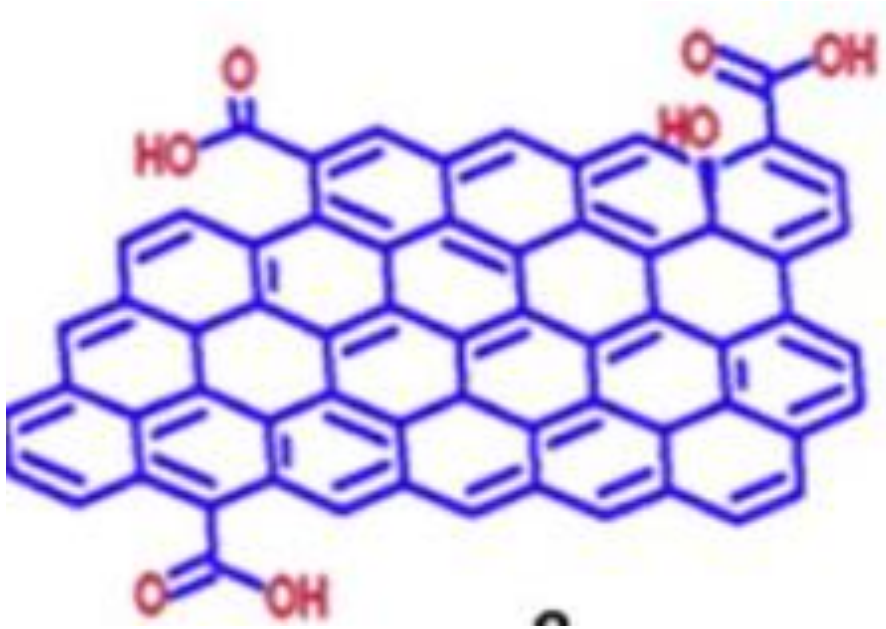
2. Графен оксиді (GO)

Графен оксиді (GO) – энергияны сақтау және түрлендіру, денсаулық сақтау, сенсорика және қоршаған ортаны тазарту сияқты әртүрлі технологиялық салаларда қолдануға мүмкіндік беретін ерекше қасиеттері бар графен туындысы. Ол негізгі жазықтығында гидроксил және эпоксид сияқты оттегісі бар функционалдық топтармен, ал шеттерінде карбонил, карбоксил және фенол топтарымен көмкерілген көміртегі атомдарының бір қабатты парағынан тұрады. Бұл топтар материалдың қасиеттерін (мысалы, электр өткізгіштігін) таза графенге қарағанда өзгертіп, оны гидрофильді етеді. Бұл әсіресе суда дисперсиялану маңызды рөл атқаратын сұйық ортадағы процестер үшін өте тиімді. Кейбір қасиеттері таза графеннен төмен болғанымен, GO графен негізіндегі басқа материалдарды алуда бастапқы шикізат ретінде және суды тазарту процестерінде табысты қолданылады.



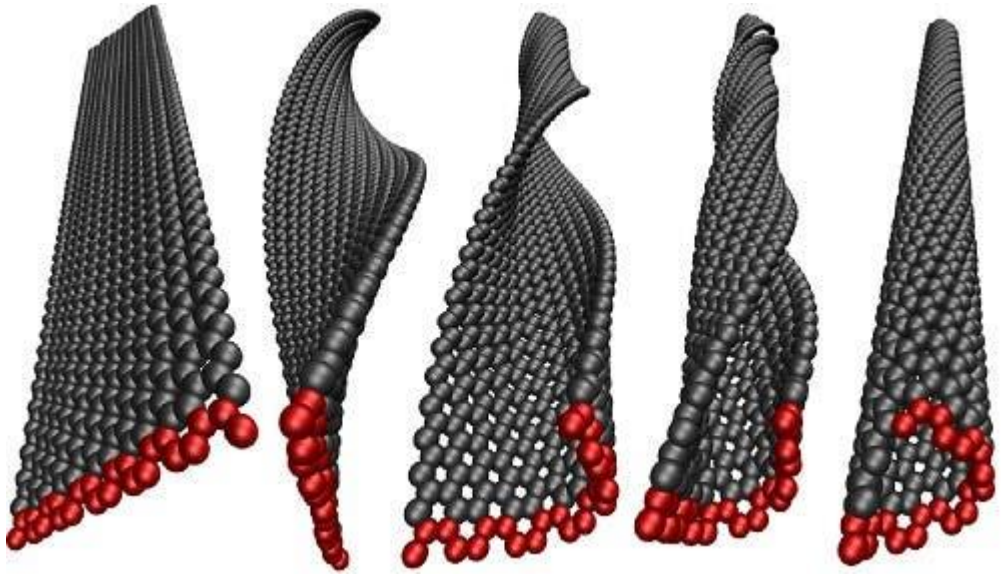
3. Тотықсыздандырылған графен оксиді (rGO)

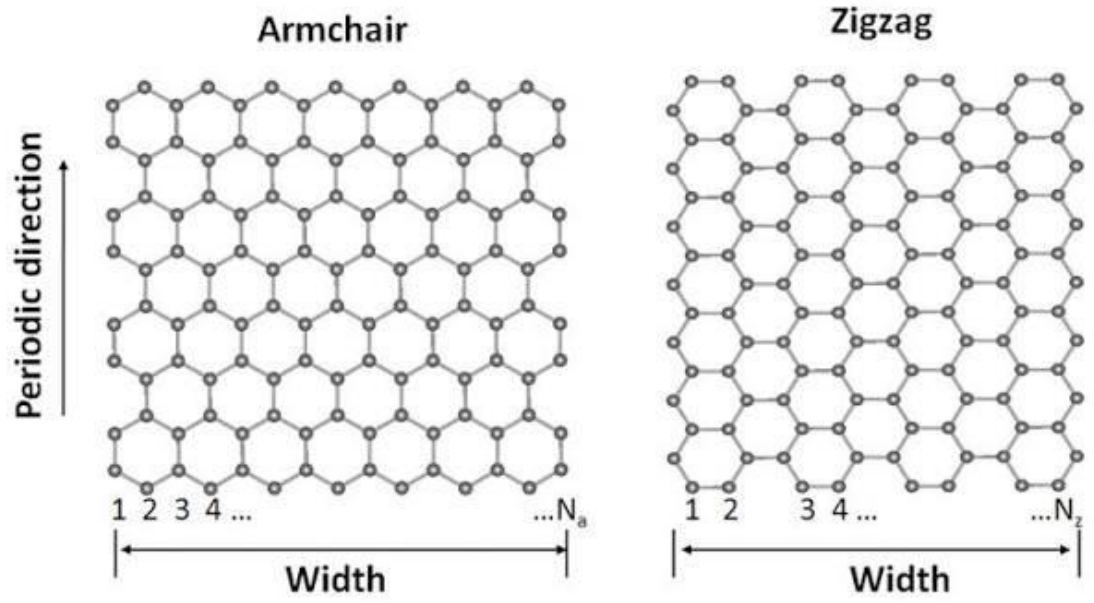
Тотықсыздандырылған графен оксиді, rGO, оттегі бар функционалдық топтарды алып тастау арқылы алынған таза графенге жақын құрылымы бар графен оксидінің тотықсыздандырылған түрі. Өндіріс әдісіне байланысты оның құрамында аз мөлшерде оттегі мен сутегі болуы мүмкін. Ол GO-ны ішінара тотықсыздандыру, электр өткізгіштігін арттыра отырып, кейбір оттегі топтарын сақтау арқылы өндіріледі. Тотықсыздану процесі оның жұмысына әсер ететін ақауларды тудырады, оны таза графеннен де, GO-дан да ажыратады. Дегенмен, оның өткізгіштігі мен гидрофильділігі оны батарея және суперконденсатор технологиясына жарамды етеді.



4. Графендік нанотаспалар (GNR)

Атауынан көрініп тұрғандай, графендік нанотаспалар – ені 100 нм-ге дейін жететін графен таспалары. Олар графендегі шеткі эффектілерді зерттеуге арналған теориялық модель ретінде Мицутака Фуджита тарапынан ұсынылған. Графендік нанотаспаларды графитті нанотомиялау, көміртекті нанотүтікшелерді осьтік бағытта кесу, нанотүтікшелерді плазмалық өңдеу және т.б. әдістер арқылы алуға болады. Графендік нанотаспаларды немесе тотыққан графендік нанотаспаларды қосу арқылы эпоксидті композиттердің, сондай-ақ полипропиленфумараттың механикалық қасиеттерінің жақсарғаны байқауға болады. Графендік нанотаспалар фотоакустикалық және термоакустикалық бейнелеу мен томографияда контрастты агент ретінде, сондай-ақ катализаторлар немесе катализатор тасымалдағыштары ретінде қолдануға қолайлы материал ретінде сипатталған.

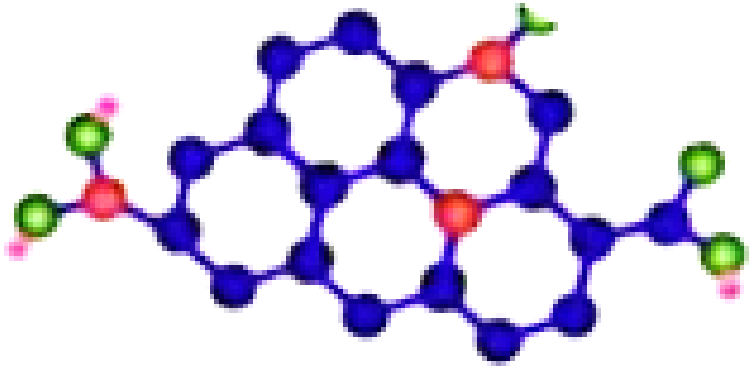


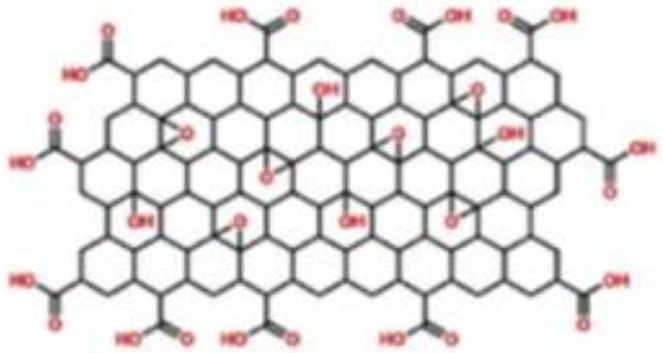


5. Графендік кванттық нүктелер (GQDs)

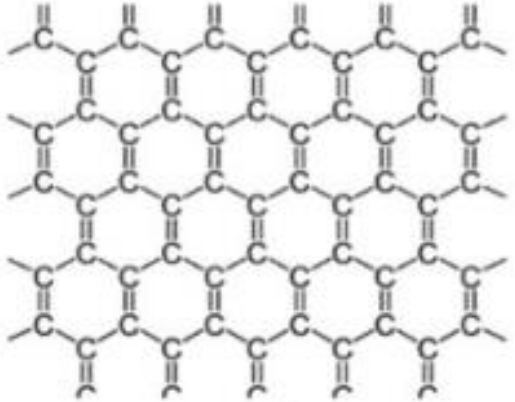
Кванттық нүктелердің (QDs) бірнеше түрі бар: бейорганикалық, органикалық, көміртекті, перовскиттік кванттық нүктелер және т.б. Графендік кванттық нүктелер (GQDs) графен мен кванттық нүктелердің тамаша қасиеттерін өзара ұштастырады. Биоүйлесімділігі, фототұрақтылығы және реттелетін люминесценциясының арқасында олар биовизуализация саласында қолдануға өте қолайлы.

Сонымен қатар, оларды қатерлі ісікті емдеуде де кездестіруге болады; мұнда ісік жасушаларының өлімін тудыру үшін олардың фототермиялық және фотодинамикалық қасиеттері пайдаланылады.

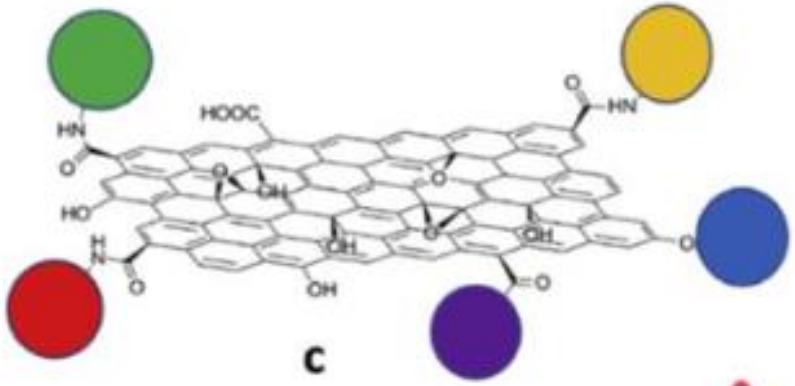




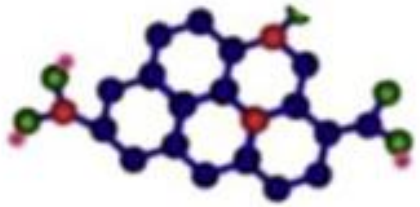
a



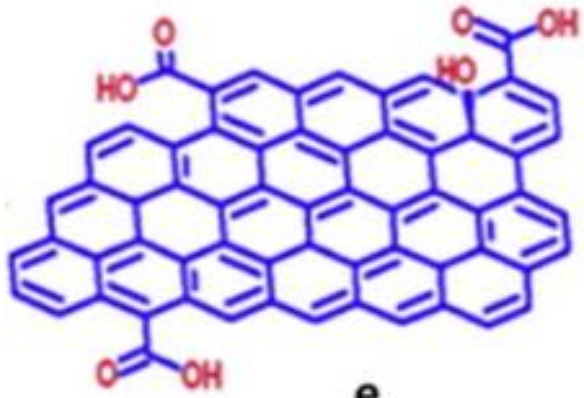
b



c



d



e

Графен алу әдістері

- Микромеханикалық бөлу
- Химиялық булы тұндыру
- Кремний карбидінің термиялық ыдырауы
- Сұйық фазада қабаттарға бөлу
- Тотығу-тотықсыздану
- Жылдам Джоульдік қыздыру

Графенді механикалық жолмен қабаттап бөлу әдісі

Әдістің негізі: графенді алғаш рет сәтті алу үшін механикалық қабаттап бөлу (*Scotch tape method*) әдісі қолданылды. Бұл — көлемді графиттен графеннің бір атомдық қалыңдықтағы қабаттарын бөліп алуға негізделген *top-down* синтез тәсілі.

Алыну кезеңдері:

1.Жоғары реттелген пиролитикалық графитке жабысқақ таспа бірнеше рет жапсырылады және ажыратылады.

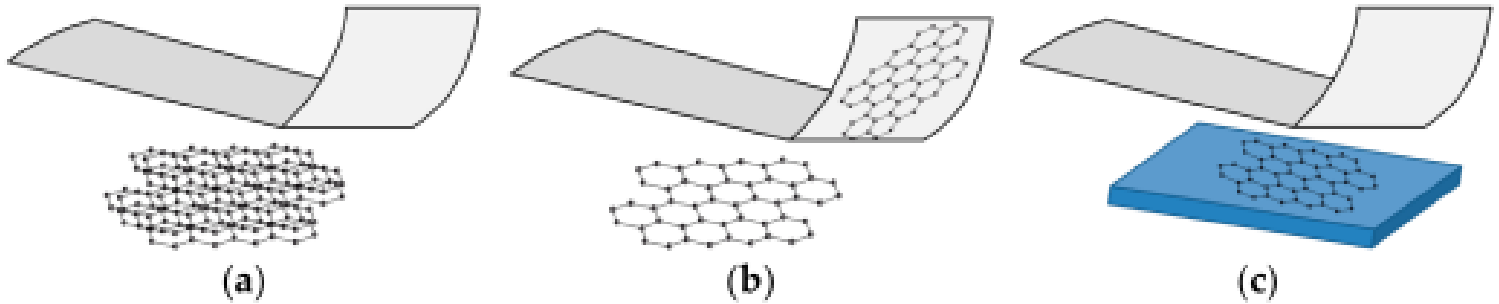
2.Әр ажырату кезінде графиттің жұқа қабаттары бөлініп, таспаға жабысады.

3.Графен қабаттары оксидтелген кремний пластинасына (Si wafer) көшіріледі.

4.Таспа ацетон сияқты еріткіштің көмегімен ерітіледі, нәтижесінде графен қабыршақтары пластина бетіне тұнады.

Артықшылығы: жоғары сапалы графен қабаттарын алуға және графеннің бар екенін эксперименттік тұрғыдан дәлелдеуге мүмкіндік берді.

Кемшілігі: өнім шығымы төмен болғандықтан, графенді өнеркәсіптік ауқымда өндіруге тиімсіз. Сондықтан өнім мөлшері мен өндіріс қайталанымдылығын арттыру үшін басқа әдістер әзірленді.



Скотч әдісі арқылы графен алудың негізгі кезеңдері: (a) скотчты жоғары реттелген пиролиттік графитке жабыстыру, (b) скотчта жұқарақ графен қабаттарының түзілуіне әкелетін қайталанатын қабыршақтау және (c) графен қабатын тотыққан кремний субстратына ауыстыру мен еріткіштер көмегімен скотчты алып тастау.

Графенді химиялық бу тұндыру әдісімен алу (CVD)

Әдістің принципі: химиялық бу тұндыру (CVD) — екіөлшемді материалдарды, соның ішінде графенді алуға арналған әдіс.

Негізгі кезеңдері:

1.Мыс пластинасы (Cu) метан (CH_4) атмосферасында жоғары температураға дейін қыздырылады.

2.Метанның көміртек атомдары мыс бетінде қалып, сутек атомдары қозғалысын жалғастырады. Нәтижесінде бір атом қалыңдықтағы тығыз байланысқан көміртек қабаты түзіледі.

3.Графен бетіне қорғаныш полимері — полиметилметакрилат (PMMA) центрифугалық жабу әдісімен жағылады.

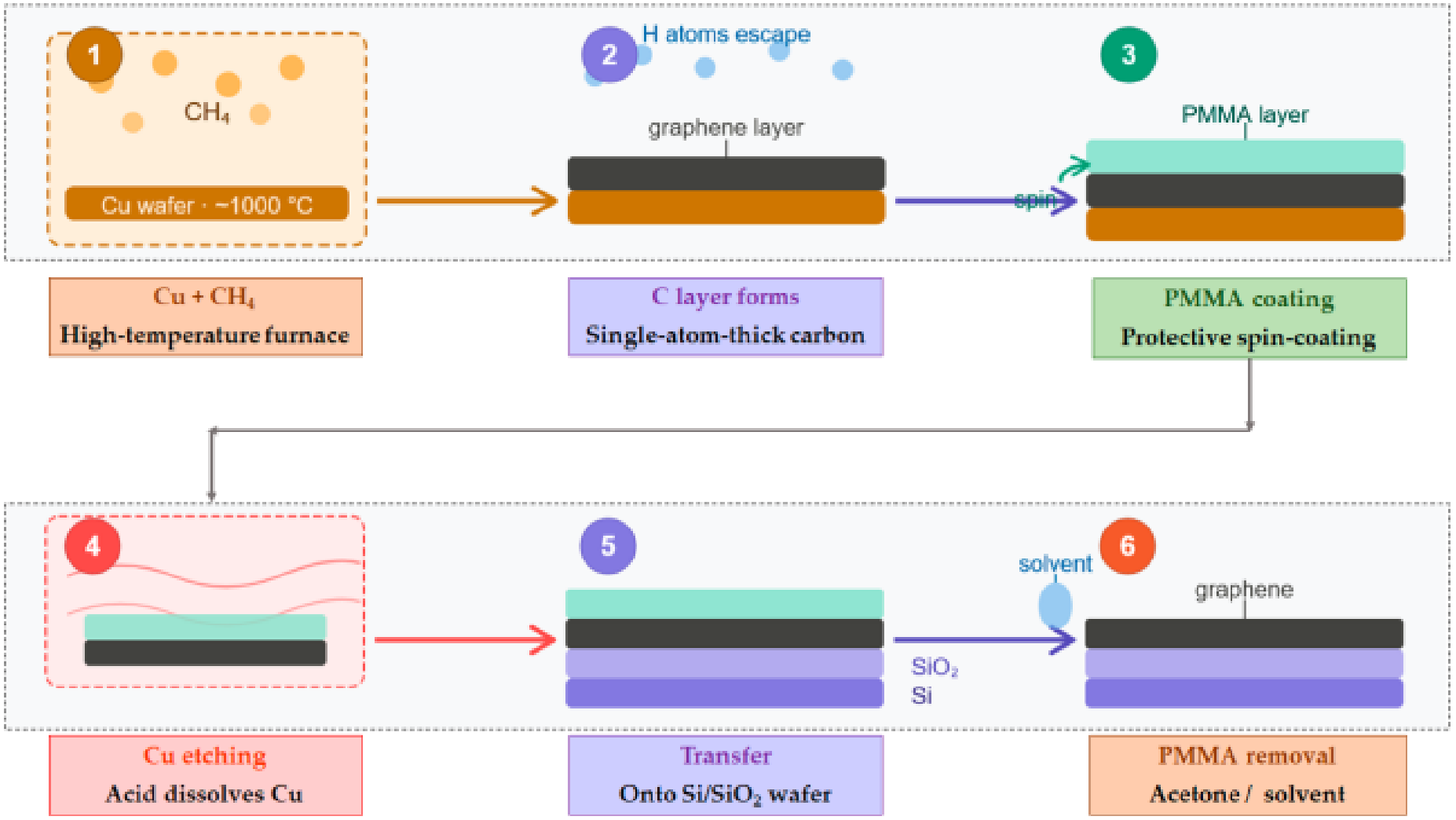
4.Мыс негізі графенмен әрекеттеспейтін қышқыл арқылы ерітіледі.

5.Қышқыл қалдықтары жуылғаннан кейін PMMA/графен қос қабаты Si/SiO_2 пластинасына көшіріледі.

6.PMMA ацетон сияқты еріткішпен жойылып, графен қабықшасы негізде қалады.

Артықшылықтары: жоғары сапалы графенді үлкен аумақта алуға мүмкіндік береді; механикалық қабаттап бөлу әдісімен салыстырғанда өнім шығымын шамамен бір ретке арттырады.

Шектеулері: арнайы жабдықты, күрделі өндірістік процесті және температураны, қысымды, газ ағынын мұқият бақылауды қажет етеді.

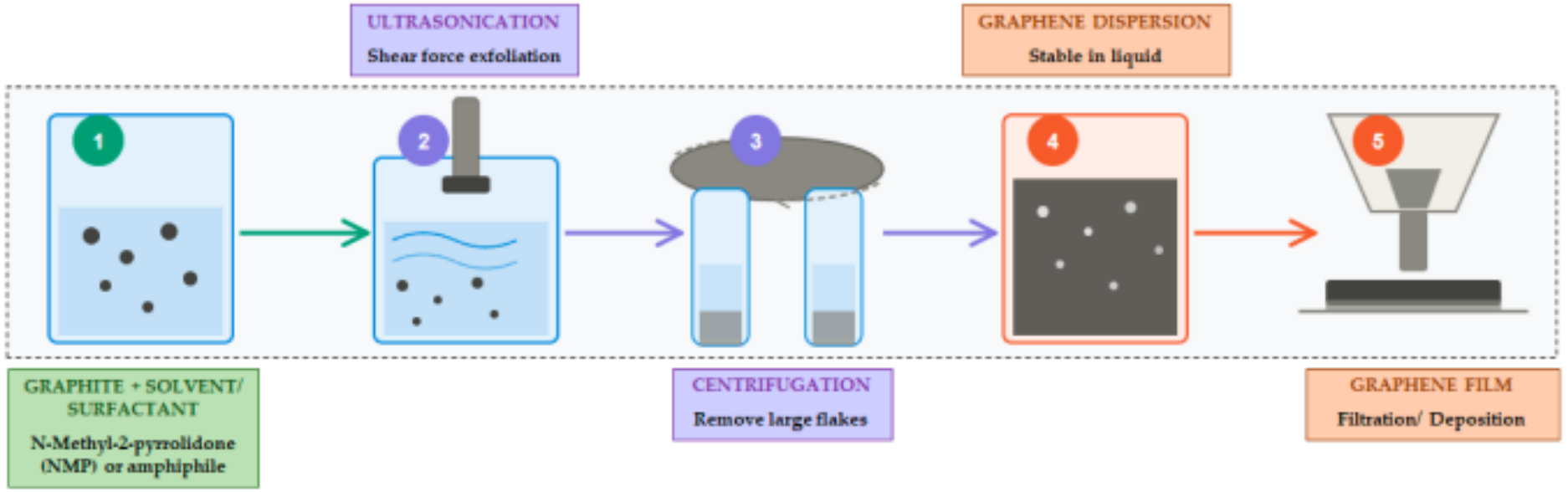


3-сурет. Мыс субстратында графен алуға арналған химиялық булы тұндыру (CVD) процесінің схемалық бейнесі: (1) жоғары температурада (~1000 °C) метан (CH4) ортасына орналастырылған мыс (Cu) пластинасы; (2) сутегі (H) атомдары бөлініп шыққан кезде, көміртек (C) атомдары мыс бетіне шөгіп, қалыңдығы бір атомнан тұратын графен қабатын түзеді; (3) графен қабаты айналдыра жағу (spin-coating) әдісімен поли(метилметакрилат, PMMA) қорғаныш қабатымен жабылады; (4) мыс субстраты қышқылда ерітіледі (мыс өңдеу/травление), нәтижесінде PMMA/графен қос қабаты босап шығады; (5) қос қабат Si/SiO2 пластинасына ауыстырылады; және (6) PMMA қабаты ацетон немесе басқа қолайлы еріткіш көмегімен алынып тасталады, сөйтіп субстратта графен үлдірі қалады.

Сұйық фазада қабаттарға бөлу

Сұйық фазада қабаттарға бөлу (LPE) – графиттен графен алу үшін қолданылатын әдіс. Графиттің сұйық ортадағы дисперсиясы еріткіштер мен ультрадыбыстық өңдеуді қолдану арқылы жүзеге асырылады. Әдетте, бұл процесс графен парақтарының қайта бірігуіне (агрегациясына) жол бермеу үшін N-метил-2-пирролидон (NMP) еріткішін немесе әртүрлі беттік-белсенді заттарды (ББЗ) пайдалануды қамтиды. Содан кейін қабаттарға бөлінген графен центрифугалау арқылы бөлінбеген графит парақтарынан өлшемі мен қабат санына қарай ажыратылады. Алынған тұрақты графен дисперсиясын вакуумдық сүзу арқылы одан әрі өңдеп, әртүрлі мақсатта қолдануға жарамды графен үлдірлерін алуға болады

LPE процесінің негізгі кезеңдері 4-суретте схемалық түрде көрсетілген; онда графитті еріткіште/ББЗ-да дисперсиялау (1-қадам), ультрадыбыстық өңдеу (2-қадам), центрифугалау (3-қадам), графен дисперсиясын жинау (4-қадам) және сүзу/тұндыру арқылы соңғы үлдірді қалыптастыру (5-қадам) сияқты дәйекті кезеңдер бейнеленген. Өндіріс көлемін оңай арттыруға болатынына қарамастан, LPE әдісімен графен алу кезінде қолданылған беттік-белсенді заттардан ақаулар мен ластанулар пайда болуы, сондай-ақ алынған графен қалыңдығының біркелкі болмауы сияқты мәселелер туындайды. Әлемдік графен өндірісінің жартысынан көбі LPE әдісіне негізделген деп бағаланады.



4. Кремний карбидін (SiC) термиялық ыдырату
SiC бақыланатын ортада, аса жоғары вакуумда немесе аргон атмосферасында қыздырылады.
Кремний атомдарының сублимациясы нәтижесінде көміртекке бай бет түзіліп, графен қабаттары қалыптасады.
Артықшылығы: үлкен аумақты, жоғары сапалы графен алу.
Кемшілігі: температура мен қыздыру уақытын қатаң бақылау қажет; алынған графен қымбат.

5. Тотығу–тотықсыздандыру әдісі
Графит күшті тотықтырғыштармен (азот, күкірт қышқылдары және калий перманганаты) тотықтырылып, графен оксиді (GO) алынады.
Ультрадыбыстық өңдеу арқылы қабаттар ажыратылады, кейін тотықсыздандыру нәтижесінде тотықсызданған графен оксиді (rGO) түзіледі.
Артықшылығы: көп мөлшерде, төмен шығынмен өндіруге болады; өндіріс ауқымын кеңейтуге қолайлы.
Кемшілігі: құрылымдық ақаулар мен оттекті топтардың қалдықтары электрлік қасиеттерін төмендетеді.

6. Жылдам импульстік Джоуль қыздыру (Flash Joule Heating)
Көмірге бай материалдар (көмір, тағам қалдықтары және т.б.) жоғары энергиялы электр импульстері арқылы өте жоғары температураға, кейде 3000 °C-тан жоғары деңгейге дейін, жылдам қыздырылады және салқындатылады.
Көміртек атомдарының қайта құрылуы нәтижесінде графен түзіледі.
Артықшылығы: әртүрлі көміртекке бай шикізатты пайдалануға болады; қабатаралық қашықтықты, ақаулар концентрациясын және гетероатомдық қоспаларды басқаруға мүмкіндік береді.
Мысал: 2025 жылы Хоссейнзаде және әріптестері осы әдіспен магниттік қасиеттері реттелген графен алды.
Анықтамаларды бірізді реттеңізАртықшылықтар мен кемшіліктерді теңестіріңіз

Графен негізіндегі материалдардың қасиеттері мен сипаттамалары

Меншікті беткі ауданы: графеннің жоғары меншікті беткі ауданы оны қоршаған ортаны қорғау саласында жеке немесе композиттік материалдар құрамында адсорбент ретінде қолдануға мүмкіндік береді.
Химиялық тұрақтылығы: графеннің салыстырмалы түрде жоғары химиялық тұрақтылығы оның басқа заттармен әрекеттесуін шектейді. Функционалдандыру арқылы қасиеттерін мақсатты түрде жақсартуға болады.
Қабат санының әсері:

Бірқабатты графен (SLG) — ең жоғары меншікті беткі ауданға ие, сондықтан адсорбция үшін тиімді.
Екіқабатты (DLG) және көпқабатты графен (MLG) — қабаттар саны артқан сайын қолжетімді беткі аудан азаюы мүмкін, бірақ тұрақтылығы жоғарылауы ықтимал.
Графен оксиді (GO) — кейбір негізгі қасиеттері төмендегенімен, құрамындағы функционалдық топтар әртүрлі заттармен әрекеттесуін күшейте алады.

Қасиеттердің өзгеруі: қабат қалыңдығының артуы меншікті беткі ауданды, электрондардың қозғалғыштығын, жылу өткізгіштікті және серпімділік қасиеттерін төмендетуі мүмкін.
Функционалдандырудың маңызы: графен қасиеттерінің төмендеуін шектеуге және оларды нақты қолдану мақсатына бейімдеуге мүмкіндік береді. Бұл адсорбциялық және каталитикалық тиімділікті сақтауда маңызды.
Мәтінді ғылыми стильде нақтылаңызҚорытынды бөлімін қосыңыз

Properties	SLG	DLG	MLG	GO
Electron mobility [$cm^2\ V^{-1}\ s^{-1}$] [49–52]	2×10^5	10^5	300–1150	200
Specific surface area [$m^2\ g^{-1}$] [53–56]	2630	1300	270–1500	750–2400
Thermal conductivity [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$] [57,58]	5000	1900	1100	70–670
Young's modulus [GPa] [59–61]	2400	2000	1850	32

SLG—Single-layer graphene; DLG—Double-layer graphene; MLG—Multiple-layer graphene; GO—Graphene oxide.

Графен негізіндегі композиттер арқылы суды ластаушы заттардан тазарту

Негізгі әдіс — адсорбция: қолданудың қарапайымдылығы, экономикалық тиімділігі және адсорбенттерді дайындаудың жеңілдігіне байланысты суды тазартуда кеңінен қолданылады.
Ластаушы заттардың түрлері: пестицидтер, фармацевтикалық препараттар, жеке күтім өнімдері, органикалық бояғыштар, ауыр металдар, газ тәрізді ластаушылар (NO_x, SO_2), ұшпа органикалық қосылыстар (VOCs) және қатты бөлшектер (PM_{10}, $PM_{2.5}$).
Графеннің негізгі артықшылықтары:

- жоғары меншікті беткі аудан;
- реттелетін беттік химия;
- механикалық беріктік пен химиялық тұрақтылық;
- электрлік және жылу өткізгіштік.

Қоршаған ортаны тазарту тәсілдері:

Су: адсорбция, фотокатализ және сүзу.
Ауа: адсорбция, сүзу және сенсорлық анықтау.
Топырақ: ластаушыларды жою, иммобилизациялау және тұрақтандыру.

Қорытынды: графен негізіндегі материалдар әртүрлі ортадағы ластаушы заттарды жоюға арналған әмбебап әрі перспективалы материалдар болып табылады.

CONTAMINATED ENVIRONMENT

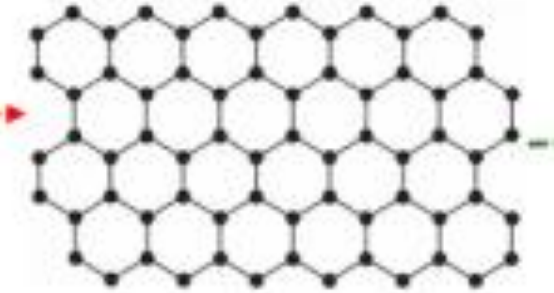


ENVIRONMENTAL POLLUTANTS

- Pesticides
- Pharmaceuticals
- Personal care products
- Organic dyes
- Heavy metals
- Gaseous pollutants (NO_x, SO_2)
- Volatile organic compounds (VOCs)
- Particulate matter (PM_{10}, $PM_{2.5}$)
- etc.

MATERIALS BASED ON GRAPHENE

- High specific surface area
- Tunable surface chemistry
- Mechanical strength and chemical stability
- Electrical and thermal conductivity



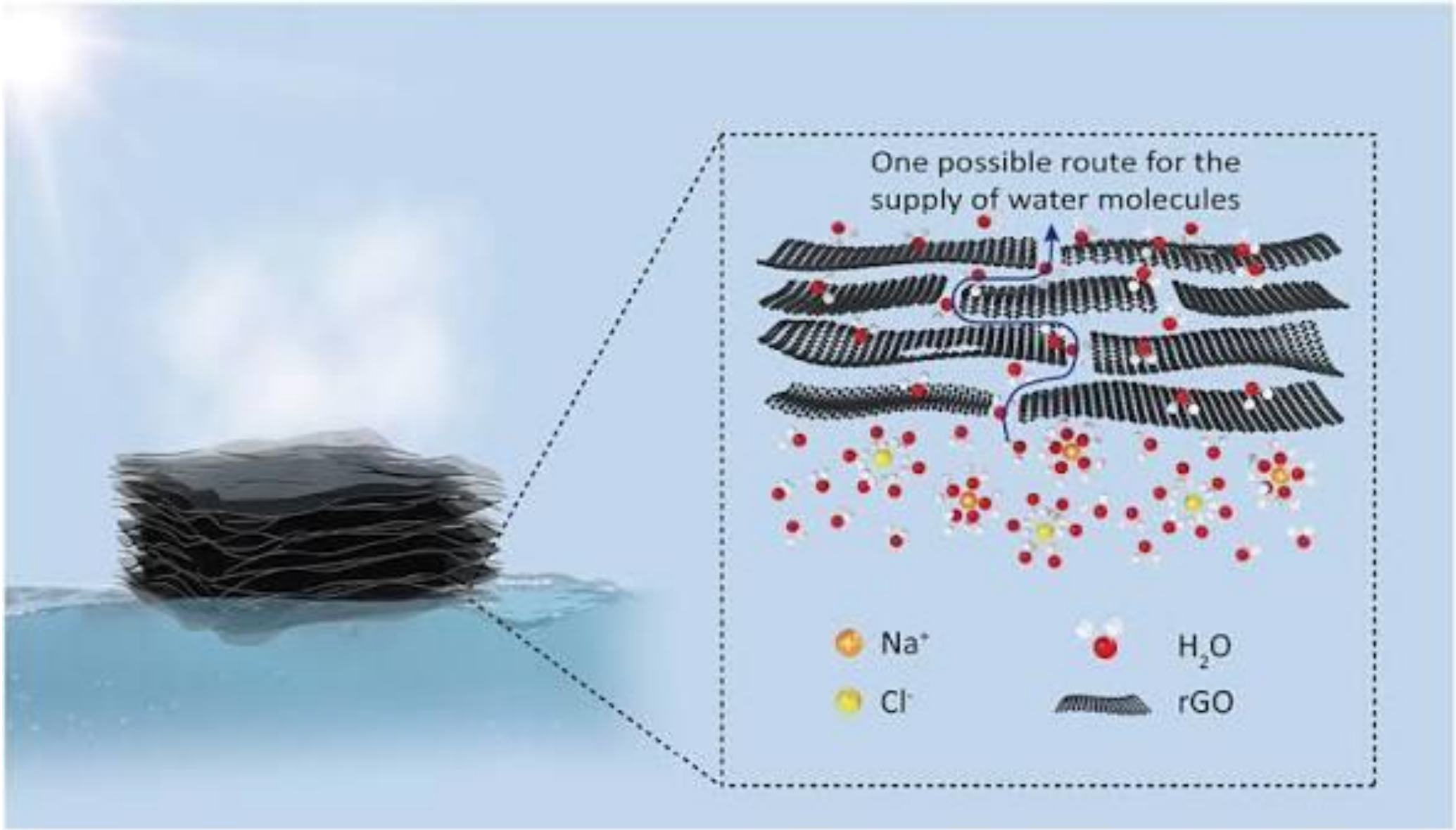
CLEANER ENVIRONMENT



Air:
- Adsorption
- Filtration
- Sensing

Water:
- Adsorption
- Photocatalysis
- Filtration

Soil:
- Remediation
- Immobilization
- Stabilization


One possible route for the supply of water molecules
Na+
H2O
Cl-
rGO

Графен негізіндегі материалдармен ауаны тазарту

1. Ауа сүзгілерінің түрлері
Кеуекті мембраналар — ірі бөлшектерді ұстайды.
Талшықты сүзгілер — ұсақ бөлшектерді тиімді ұстайды.
$PM_{2.5}$ және PM_{10}: диаметрі тиісінше 2,5 және 10 мкм-ге дейінгі бөлшектер. $PM_{2.5}$ жүрек-қантамыр жүйесіне зиян келтіреді, ал $PM_{0.3}$ бөлшектерін ұстау өте қиын. Бұл бөлшектер адам мен жануарлардың денсаулығына, сондай-ақ өсімдіктердің фотосинтезіне кері әсер етеді.
2. Графен оксиді (GO) негізіндегі мембрана
Zou және әріптестері (2019) GO мембранасын ластанусыз әдіспен тоқыма емес матаға жағу арқылы дайындады.
$PM_{2.5}$ бөлшектерін жою тиімділігі — 99,46% (ауа ағынының жылдамдығы 0,1 м/с).
3. CO_2 адсорбциясы
Плазмамен функционалданған графен (N_2/H_2): CO_2 адсорбция сыйымдылығы түтін газдары үшін 1,6-дан 3,3 ммоль/г-ға, ал атмосфералық ауадан ұстау кезінде 0,14-тен 1,3 ммоль/г-ға артты.
40 адсорбция–десорбция циклінен кейін сыйымдылықтың төмендеуі 17–19% болды.
Целлюлоза–графен оксиді аэрогелі (2025): аминопропилтриэтоксисиланмен (APTES) функционалданған адсорбенттің CO_2 сыйымдылығы 20 °C және 1 бар қысымда 2,5 ммоль/г құрады. Шикізат ретінде макулатурадан алынған целлюлоза пайдаланылды.
4. H_2S адсорбциясы
Cu-BTC металл-органикалық қаңқасына (MOF) графен оксидін (GO), азқабатты графенді (FLG) немесе термиялық тотықсыздандырылған графенді (TRG) 0,5 масс.% мөлшерінде қосу зерттелді.
Cu-BTC/GO: 28,7 және 24,2 мг/г (298 және 423 K).
Cu-BTC/FLG: 44,6 және 53,7 мг/г.
Cu-BTC/TRG: 44,2 және 26,8 мг/г.
Таза Cu-BTC көрсеткіштері: 22,1 және 21,6 мг/г.
Нәтиже: графен туындылары композиттердің кеуек көлемін, кеуектілігін және меншікті беткі ауданын арттырып, H_2S адсорбциясын жақсарта алады.

Топырақты қалпына келтіруге арналған графен негізіндегі материалдар

1. Топырақты негізгі ластаушылар
Пестицидтер, мұнай көмірсутектері, ауыр металдар (As, Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Cr, Ni) және өнеркәсіптік ағындылар.
Олар топырақ құнарлылығын төмендетіп, өсімдіктердің өсуіне, тұқымның өнуіне және ауыл шаруашылығы өнімділігіне кері әсер етеді.
2. Графен негізіндегі материалдардың түрлері
Таза графен және азқабатты графен.
Графен оксиді (GO).
Графен негізіндегі нанокомпозиттер.
Функционалдандырылған графен.
3. Топырақты тазартудағы зерттеу нәтижелері
Baragaño et al. (2020): графен оксидінің нанобөлшектері Cu, Pb және Cd металдарын иммобилизациялап, As және P элементтерін қозғалмалы күйге ауыстырды.
Akhtar et al. (2024): қант қамысы қалдығынан алынған және химиялық жолмен қабатталған графен оксиді мен магнетит нанобөлшектері мышьякты жою және иммобилизациялау тиімділігін **65–99,3%** деңгейінде көрсетті.
Wang et al.: графен оксиді лесс топырағының ыдырауын азайтып, оның су ұстау қабілетін жақсартты. Тотықсыздану дәрежесі 50% болғанда су ұстау қабілеті артты, ал 100% болғанда төмендеді.
4. Қолданудың перспективалары
•Ластаушы заттарды жою және иммобилизациялау.
•Ластаушылардың каталитикалық ыдырауын қамтамасыз ету.
•Топырақтың су ұстау қабілетін жақсарту және эрозияны азайту.
•Графен негізіндегі материалдарды фиторемедиациямен біріктіріп қолдану.
Қорытынды: графен негізіндегі материалдар ластанған топырақты тазарту, оның қасиеттерін жақсарту және экологиялық қалпына келтіру үшін перспективалы шешім болып табылады.

Adsorbent	Pollutant	Performance	F
rGO@ZnO	Rhodamine B(RhB)	Improved RhB adsorption versus neat ZnO; 99% recovery over several reuse cycles under simulated sunlight	
rGO–N-$CaTiO_3$ composite	Methylene blue	Enhanced adsorptive-photocatalytic removal versus bare materials; stable and recyclable	
$ZnFe_2O_4$@rGO magnetic nanocomposite	Pb(II)	89.8 mg g^{-1} adsorption capacity	
$ZnFe_2O_4$@rGO magnetic nanocomposite	Methylene blue	119.0 mg g^{-1} adsorption capacity; reusable for five cycles	
PG@GO@PEI	Cr(VI)	Removal rates close to 100%; maximum capacity 313.5 mg g^{-1}	
PG@GO@PEI	Naphthol Green B	Removal rates close to 100%; maximum capacity 425.5 mg g^{-1}	
PG@GO@PEI	Malachite Green	Removal rates close to 100%; maximum capacity 3300.9 mg g^{-1}	
Graphene	Perchlorate	99.2% adsorption efficiency; capacity up to 0.024 mg g^{-1}	
Graphene	Methylene blue	Maximum adsorption capacity of about 1.52 g g^{-1}; stable for five cycles	
Graphene	p-toluenesulfonic acid	Maximum adsorption capacity of about 1.43 g g^{-1}	
Graphene	1 1-naphthalenesulfonic acid	Maximum adsorption capacity of about 1.46 g g^{-1}	



GO-ordered mesoporous silica composite	As	97.7% removal efficiency	[121]
GO-ordered mesoporous silica composite	Cd	96.9% removal efficiency	[121]
GO-ordered mesoporous silica composite	Cr	96.0% removal efficiency	[121]
GO-ordered mesoporous silica composite	Hg	98.5% removal efficiency	[121]
GO-ordered mesoporous silica composite	Pb	78.7% removal efficiency	[121]
GO	Ciprofloxacin	Adsorption capacity of 500 mg g^{-1}	[77]
GO	Zn(II)	Adsorption capacity of 345 mg g^{-1}	[77]
GO	Methylene blue	Adsorption capacity of 450 mg g^{-1}	[77]
GO	Neonicotinoids	Adsorption capacity of 3.11 mg g^{-1}	[77]
Graphene-based aerogels	Pb, Zn, Cd	Reported adsorption efficiencies of 367, 246, and 106.3 mg g^{-1}, respectively	[122]

PG@GO@PEI—phosphogypsum (PG) with graphene oxide (GO) and polyethyleneimine (PEI); rGO—reduced graphene oxide.