Д5. Графен мен нанотүтікшелердің қолданылуы

Электроника · Энергия сақтау · Медицина

1D · Көміртекті нанотүтікшелер

Электр өткізгіш желілер, транзисторлар, күшейткіш композиттер

2D · Графен

Мөлдір электродтар, энергия жинақтау, сенсорлық платформалар

Дәрістің мақсаты және күтілетін нәтижелер

Мақсаты

Графен мен көміртекті нанотүтікшелердің құрылым–қасиет–қолданылу байланысын талдау және инженерлік артықшылықтары мен шектеулерін бағалау.

Дәріс жоспары

Электроника және сенсорлар → **Энергия жинақтау және сақтау** → **Медициналық бағыттар** → **Өндірістік енгізу және қауіпсіздік**

Оқу нәтижесі: студент материал таңдаудың ғылыми негізін түсіндіреді, көрсеткіштерді салыстырады және зертханалық нәтижені коммерциялық дайындықпен шатастырмайды.

Неліктен графен мен нанотүтікшелер қолданылады?

Графен (2D)

Жоғары беттік аудан; жылу және заряд тасымалы; жұқа, иілгіш қабаттар; функционалданатын бет.

Нанотүтікшелер (1D)

Үлкен ұзындық/диаметр қатынасы; өткізгіш перколяциялық торлар; механикалық беріктік; қуыс арналар.

Қасиеттерді қолдану қажеттілігіне сәйкестендіру

Құрылым және ақаулар → **Функционалдану және дисперсия** → **Құрылғы интерфейсі** → **Нақты тиімділік**

Қолданылу бағыттарының салыстырмалы картасы

Бағыт	Графен	КНТ	Негізгі шектеу
Электроника	Мөлдір электрод, FET, сенсор	CNFET, өткізгіш желі	Біркелкілік және контакт
Суперконденсатор	Электрод, өткізгіш қаңқа	3D өткізгіш тор	Тығыздық пен кеуекке қолжетімділік
Батарея	Қоспа, ток жинағыш	Өткізгіш қоспа	Кері айналымдылық және құн
Медицина	Биосенсор, тасымалдау зерттеулері	Сенсор, композит	Уыттылық және клиникалық валидация

Графен: мөлдір және иілгіш электродтар

Тиімділік өлшемдері

Оптикалық өткізгіштік T (%) және беттік кедергі R_s (Ω/□) арасындағы компромисс маңызды. Тасымалдау, астар және допинг тұрақтылыққа әсер етеді.

Нақты ғылыми мысал

Bae және әріптестері (2010): 30 дюймдік CVD графен қабықшалары; шамамен 97,4% өткізгіштік және 125 Ω/□ беттік кедергі (нақты өңдеу жағдайында).

$$R_s = \rho / t$$

ρ — меншікті кедергі, t — қабаттың тиімді қалыңдығы; өте жұқа материал үшін өлшеу геометриясы маңызды

Дереккөз: Bae et al., Nature Nanotechnology (2010), DOI: 10.1038/nnano.2010.132

Далалық транзисторлар (FET): графен және CNT

Қақпа кернеуі Vg → Тасымалдаушылар тығыздығы → Арна өткізгіштігі → Шығыс тогы Id

Графен арнасы

Жылдам тасымал және сенсорлар үшін пайдалы; идеал графендегі нөлдік тыйым салынған аймақ digital on/off қатынасын шектейді.

Жартылай өткізгіш КНТ

Диаметрі мен хиральдылығы электрондық аймаққа әсер етеді; жоғары on/off қатынасы мүмкін, бірақ металдық КНТ қоспалары мәселе туғызады.

CNT негізіндегі интегралдық схемалар: дәлелденген нәтиже

Hills et al. (2019), Nature

16-биттік RISC-V микропроцессоры · 14 000-нан астам комплементарлық CNFET

Ғылыми жаңалық

Металдық КНТ, материалдағы ақаулар және құрылғы айырмашылықтары өндіріс пен жобалау арқылы басқарылған.

Нені дәлелдемейді?

Бұл зерттеу барлық көміртекті микросхемалардың кремнийден толық артық екенін немесе технология жаппай өндірісте екенін білдірмейді.

Дереккөз: Hills et al., Nature 572, 595–602 (2019), DOI: 10.1038/s41586-019-1493-8

Сенсорлар: беттегі адсорбциядан электрлік сигналға дейін

Газ / биомолекула → Бетке адсорбция → Заряд / контакт өзгерісі → ΔR, ΔI немесе ΔV

Сезімталдық

$S = (R - R_0) / R_0 \times 100\%$; жауап бағыты материалдың типі мен ортаға тәуелді.

Селективтілікті арттыру

Функционалдық топтар, металл нанобөлшектер, полимер жабындысы және бірнеше сенсор сигналын бірлесіп өңдеу.

Тозатын және созылатын электроника

Құрылғы мысалдары

Иілгіш электродтар, деформация датчиктері, электрондық тері, тоқымаға кіріктірілген өткізгіш желілер.

Жұмыс принципі

Созылу кезінде КНТ түйіспелерінің, графен қабыршақшаларының және өткізгіш жолдардың кедергісі өзгереді.

$$GF = (\Delta R / R_0) / \varepsilon$$

GF — тензосезімталдық коэффициенті; ε — салыстырмалы деформация

Тексеру: гистерезис, ылғал әсері, механикалық циклдер, терімен жанасу қауіпсіздігі.

Энергия сақтау құрылғыларындағы негізгі функциялар

Құрылғы	Материал функциясы	Бағаланатын көрсеткіш
Суперконденсатор	Электрод бетін / өткізгіш торды қалыптастыру	Csp, энергия, қуат, циклдік төзімділік
Li-ion батарея	Өткізгіш қоспа, матрицаны күшейту	mAh/g, кулондық тиімділік, цикл
Na-ion батарея	Электрон жолдары, гибридті құрылым	Сыйымдылық, жылдамдық қасиеті
Li–S жүйесі	Полисульфид миграциясын тежеуге арналған қосымша қаңқа	Күкірт жүктемесі, аудандық сыйымдылық

Суперконденсатор: қос электр қабаты және псевдосыйымдылық

EDLC

Иондар электрод/электролит шекарасында жиналады. Кеуекке қолжетімді аудан және иондардың тасымалы шешуші.

Псевдосыйымдылық

Беткі немесе бетке жуық жылдам фарадейлік процестер қатысады; MnO_2, өткізгіш полимерлер мен көміртекті гибридтер мысал.

$$C = Q / \Delta V \quad \cdot \quad E = \tfrac{1}{2} C V^2$$

C — сыйымдылық; E — энергия; бірліктер мен массалық/аудандық негізді міндетті түрде көрсету керек

Суперконденсатор үшін өлшеу және интерпретация

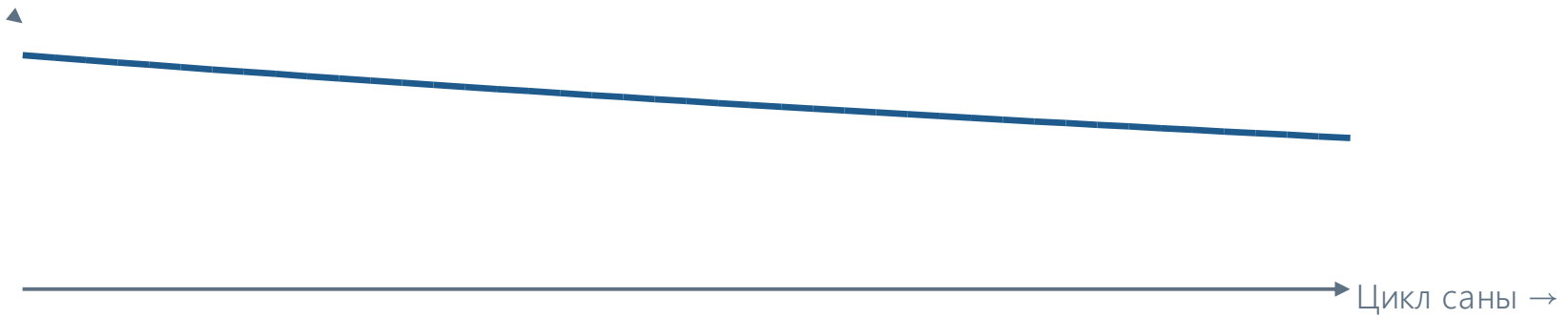
Гальваностатикалық заряд–разряд

Csp = I Δt / (m ΔV), Ф/г. m — таңдалған электрод/активті материал массасы; екі электродты құрылғыда есептеу негізін нақтылау қажет.

Электрохимиялық әдістер

CV, GCD, EIS; жылдамдық қасиеті, ESR және циклдік тұрақтылық бірге бағаланады.

Модельдік циклдік сақтау қисығы (иллюстрация)



Батареяларда графен мен КНТ-ның рөлі

Белсенді бөлшек → Өткізгіш көміртекті желі → Электрон тасымалы → Тұрақты электрод

Негізгі мүмкіндік

Электрод ішіндегі электрондық байланыстарды жақсарту және кейде механикалық бұзылуды азайту.

Критикалық шектеулер

Ион диффузиясы, электролитпен жанама реакциялар, тығыздық, өндірістік жүктеме және алғашқы циклдің шығыны.

Энергия сақтау: көрсеткіштерді дұрыс салыстыру

Өлшем	Бірлік	Мағынасы / ескерту
Меншікті сыйымдылық	mAh/g	Активті массаға шаққандағы заряд
Аудандық сыйымдылық	mAh/cm²	Практикалық электрод жүктемесін ескереді
Энергия тығыздығы	Wh/kg немесе Wh/L	Толық құрылғы массасы/көлемі маңызды
Қуат тығыздығы	W/kg	Берілген уақыттағы энергия жеткізу
Циклдік сақтау	% / цикл саны	Бірдей ток, температура және шекті кернеу қажет

3D графен–КНТ гибридтері

Құрылымдық синергия

Графен қабаттарының қайта жиналуын шектейтін КНТ тіректері және ұзын өткізгіш маршруттар арқылы ашық 3D тор түзуге болады.

Материал жобалау факторлары

Кеуек өлшемінің таралуы, контакт кедергісі, ақау мөлшері, беттік химия және композит құрамы нәтижені анықтайды.

1D КНТ → **2D графен** → **3D аралас қаңқа** → **Қызметтік электрод**

Дереккөз: 3D Graphene/Carbon Nanotube Composites, ChemNanoMat (2025), DOI: 10.1002/cnma.202400675

Медициналық бағыттар: зертханадан клиникаға дейін

Биосенсорлар

Электрохимиялық анықтау, ДНҚ/ақуыз байланысуы, глюкоза және ауру маркерлерін сезгіш платформалар.

Дәріні тасымалдау зерттеулері

Функционалданған GO/КНТ бетіне молекулаларды бекіту; босап шығу, бағытталған жеткізу және тазалықты бақылау.

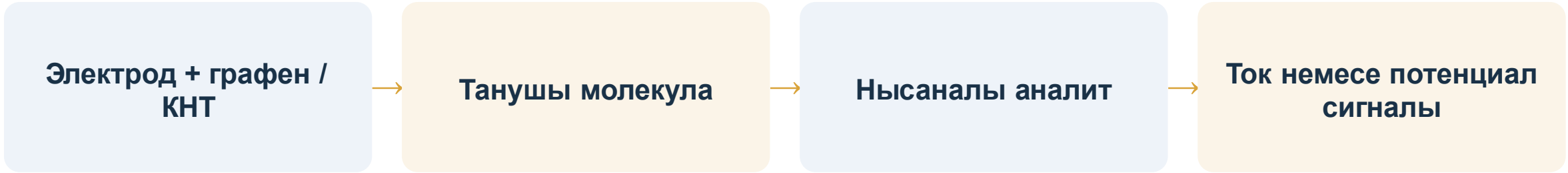
Тін инженериясы

Өткізгіш композиттер мен биоматериал қаңқалары; жасуша тіршілігі және ұзақ мерзімді үйлесімділік зерттеледі.

Маңызды шекара

Зертханалық тиімділік клиникалық қауіпсіздік пен мақұлданған емдеу әдісін білдірмейді.

Электрохимиялық биосенсордың жұмыс сұлбасы



$$I_p \quad C \quad \text{(таңдалған жұмыс аймағында)}$$

I_p — өлшенетін ток; C — аналит концентрациясы; нақты калибрлеу матрицаға және механизмге тәуелді

Валидация көрсеткіштері

LOD/LOQ, селективтілік, дәлдік, қалпына келу, күрделі биологиялық матрицадағы әсер, қайта өндірілу және сақтау тұрақтылығы.

Дәрі тасымалдауда функционалдандырудың міндеті

GO / КНТ беті → PEG / карбоксил / басқа лиганд → Дәріні бекіту → Босау мен биотағдыр

Мүмкіндіктер

Бетке молекула адсорбциясы немесе коваленттi жалғау; ерігіштік пен дисперсияны басқару.

Қиындықтар

Қалдық катализатор, бөлшек ұзындығы, агломерация, ағзада таралуы, биотұрақтылық және ұзақ мерзімді уыттылық.

Биосәйкестік және наноматериал қауіпсіздігі

Фактор	Не үшін маңызды?	Бақылау әдісі
Өлшем / пішін	Жасушамен әсерлесу, таралу	TEM, SEM, DLS (қолданылса)
Беттік химия	Ақуыз тәжі, мембранамен байланыс	XPS, FTIR, ζ-потенциал
Қоспалар	Катализатор металдары мен эндотоксиндер	ICP-MS, арнайы тесттер
Доза мен экспозиция	Нақты тәуекел деңгейі	Дозаны, уақытты, маршрутты тіркеу
Биологиялық әсер	Қабыну, оксидативтік стресс, тіршілік	Валидацияланған жасушалық/жануар модельдері

Өндірістік масштабтау және нақты енгізу

Сапа

Құрылымның партияаралық тұрақтылығы: қабат саны, КНТ хиральдылығы, диаметр, тазалық, беттік топтар.

Өндіріс

CVD өнімділігі, тасымалдау ақауы, дисперсия, еріткіш пен энергия шығыны, қалдықтарды басқару.

Экономика

Жалпы қолдану құны, сенімділік, қызмет мерзімі, қайта өңдеу, нормативтік талаптар.

Технологиялық дайындық

Мақалада көрсетілген прототип, тәжірибелік партия және сериялық өнім — үш түрлі деңгей.

Құрылғыны таңдау: инженерлік шешім матрицасы

Міндет	Ықтимал материал	Міндетті дәлел
Мөлдір иілгіш электрод	CVD графен	T, R_s, иілу циклі, байланыс тұрақтылығы
Сандық логикалық FET	Жартылай өткізгіш КНТ	on/off, шығыс, біркелкілік, өндірістік шығым
Жоғары қуатты электрод	Графен–КНТ композит	Энергия/қуат, масса/көлем негізі, ESR
Биосенсор	Функционалданған GO / КНТ	LOD, нақты үлгі, интерференция, қауіпсіздік

Есептеу тапсырмасы: тензосенсор сезімталдығы

Берілгені

Бастапқы кедергі R_0 = 1000 Ω, деформация ε = 0,02; өлшенген кедергі R = 1160 Ω.

$$GF = ((1160 - 1000) / 1000) / 0{,}02 = 8$$

Түсіндіру: 2% салыстырмалы деформацияда кедергі 16%-ға өскен

Талқылау

Бұл нәтиже материалға әмбебап мән емес. Кері бағыттағы өлшеу, қайталанған циклдер және температураның әсерін бөлек тексеру керек.

Ғылыми зерттеуді жоспарлау: көрсеткіштен қорытындыға

Мақсат және қолдану → Материал параметрі → Талдау / өлшеу → Құрылғы сынағы

Қажетті сипаттау

Raman (D, G, 2D, RBM), SEM/TEM, XPS, BET (қажет болса), төртнүктелі өлшеу, электрохимиялық тесттер.

Салыстыру қағидаты

Материал массасы, геометрия, электролит, кернеу терезесі, ылғал және температура бірдей болуы тиіс немесе айырмашылық ашық көрсетіледі.

Қорытынды: негізгі ғылыми тұжырымдар

1	**Графен**	Мөлдір электродтар, сенсорлар және өткізгіш композиттер үшін перспективалы.
2	**Көміртекті нанотүтікшелер**	Жартылай өткізгіш CNT-FET және механикалық икемді өткізгіш торларда маңызды.
3	**Энергия сақтау**	Кеуекке қолжетімділік, өткізгіштік және толық құрылғы көрсеткіштері бірге бағаланады.
4	**Медицина**	Функционалдандыру әлеует береді; клиникалық қауіпсіздік қосымша дәлелдеуді талап етеді.
5	**Болашақ**	Масштабтау, сапаны стандарттау, құн және экологиялық/биологиялық тәуекелді басқару.

Бақылау сұрақтары және аудиториялық талқылау

- Графеннің мөлдір электрод ретіндегі артықшылығы қандай және қандай параметрмен бағаланады?
- Неліктен жартылай өткізгіш КНТ-ны металдық КНТ қоспасынан ажырату маңызды?
- Суперконденсатор мен батарея үшін қандай тиімділік көрсеткіштері қолданылады?
- Биомедициналық зерттеуде материалдың қандай параметрлері қауіпсіздікке әсер етеді?
- Неліктен зертханалық жоғары нәтижені өндірістік дайындықпен теңестіруге болмайды?

Талқылау тапсырмасы

Иілгіш биосенсор немесе суперконденсатор үшін графен, КНТ және гибридтің бірін таңдап, 3 дәлел келтіріңіз.

Негізгі ғылыми әдебиеттер және дереккөздер

1. Bae S. et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. Nat. Nanotechnol. 5, 574–578 (2010). DOI: 10.1038/nnano.2010.132

2. Hills G. et al. Modern microprocessor built from complementary carbon nanotube transistors. Nature 572, 595–602 (2019). DOI: 10.1038/s41586-019-1493-8

3. Zhang Z., Zhang N., Zhang Z. High-Performance Carbon Nanotube Electronic Devices: Progress and Challenges. Micromachines 16, 554 (2025). DOI: 10.3390/mi16050554

4. Elizalde-Herrera F.J. et al. Recent Development of Graphene-Based Composites for Electronics, Energy Storage, and Biomedical Applications. J. Compos. Sci. 8, 481 (2024). DOI: 10.3390/jcs8110481

5. Shaker L.M. et al. Graphene-based materials for next-generation energy storage. J. Alloys Compd. 1036, 182079 (2025). DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.182079

6. 3D Graphene/Carbon Nanotube Composites: Synthesis, Properties, and Applications. ChemNanoMat 11, e202400675 (2025). DOI: 10.1002/cnma.202400675