

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Ершуах Райымбек Әділбекұлы

«Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық
сенсор»

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Алматы 2022

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі

 Е.Таштай

« 20 » мамыр 2022 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы «Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор»

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы

Орындаған:

Р.Ә. Ершуах

Пікір беруші
Алматы энергетика және
университеті
т. ғ. д., профессор

 Якубова М.З.

« 20 » мамыр 2022 ж.

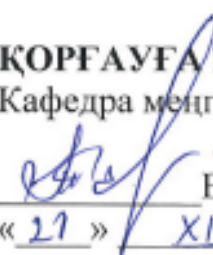
Ғылыми жетекші
байланыс PhD докторы
Қауымдастырылған профессор
Н.К.Смайлов

 « 20 » мамыр 2022 ж.

Алматы 2022

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті
Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты
Электроника, телекоммуникация және ғарыш технологиялар кафедрасы
5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ
Кафедра меңгерушісі


Е.Таштай
« 27 » XII 2022ж

Дипломдық жоба орындауға ТАПСЫРМА

Білім алушы Ершуах Райымбек Әділбекұлы
Тақырыбы Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор

Университет ректорының «24» 12 № бұйрығымен бекітілген 789-11/Ө
Аяқталған жобаны тапсыру мерізімі «30» сәуір 2022 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы деректері:

ГОСТ Р ISO 11554-2008 Оптика және фотоника. Лазерлер және лазерлік қондырғылар (жүйелер). Лазерлерді сынау және лазер сәулесінің қуатын, энергиясын және уақытша сипаттамаларын өлшеу әдістері

Жұмыстың бастапқы мәліметтері:

- а) Графен плазмоникасы – жазық жердегі оптика
- б) Аспалы графендегі өте жоғары электрондардың қозғалғыштығын зерттеу
- в) Поляризацияға сезімтал абсорбция әсеріне негізделген мөлдір субстраттағы графеннің қабаттарын дәл анықтау
- г) Толық ішкі шағылу кезіндегі графеннің поляризацияға тәуелді оптикалық абсорбциясы
- д) Optisystem бағдарламалық жүйесінде моделдеуді жүргізу

Сызбалық материалдар _15_ слайдпен көрсетілген


Дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау


КЕСТЕСІ


Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерізімі	Ескерту
Графен плазмоникасы – жазық жердегі оптика	20.01.2022	Орындалды
Аспалы графендегі өте жоғары электрондардың қозғалғыштығын зерттеу	05.02.2022	Орындалды
Поляризацияға сезімтал абсорбция әсеріне негізделген мөлдір субстраттағы графеннің қабаттарын дәл анықтау	27.02.2022	Орындалды
Толық ішкі шағылу кезіндегі графеннің поляризацияға тәуелді оптикалық абсорбциясы	20.03.2022	Орындалды
Optisystem бағдарламалық жүйесінде моделдеуді жүргізу	20.04.2022	Орындалды
Дипломдық жұмысты рәсімдеу, плагиатқа қарсы, рецензия және нормобақылау	30.04.2022	Орындалды

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа (жоба) қойған

Қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Норма бақылау	PhD докторы Қауымдастырылған профессор Смайлов Нуржигит Куралбаевич	18.05.2022	

Ғылыми жетекшісі PhD докторы  Н.К.Смайлов
(қолы)

Тапсырманы орындауға алған білім алушы  Р.Ә.Ершуах
(қолы)

Күні «20» мамыр 2022 ж.

АНДАТПА

Бұл тапсырылған дипломдық жұмыста графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор қарастырылады.

Зерттеудің екі пайдалы және қолданыста айрықша орны бар саласы – графен мен плазмоника. Бір-біріне өте қатты сәйкес келеді. Графеннің жеке плазмондары ғана емес, олардың реттелетін және салыстырмалы түрде төмен дисперсиясы, сонымен қатар графеннің асыл металдардың наноқұрылымдарымен үйлесуі көп нәрсені уәде етеді. Бұл талдаулар плазмоникаға арналған қызықты қосымша болып табылады. Графеннің әмбебаптығы мынаны білдіреді: графен негізіндегі плазмоника әртүрлі жиілік диапазоңдарында жұмыс істейді және жаңа оптикалық құрылғылардың өндірісін қамтамасыз ете алады. Сонымен қатар терагерцтен көрінетін жарыққа дейін теңдесі жоқ жылдамдықпен, төмен кернеумен, қуатты аз тұтынумен және кішкентай физикалық қолтаңбамен ерекшеленеді. Осы жобада біз графен физикасын, толық ішкі шағылу кезіндегі графеннің поляризацияға тәуелді оптикалық абсорбциясын және Талшықты оптикалық сенсор құрылғысын моделдеу арқылы қарастыратын боламыз.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном работе рассматривается оптоволоконный датчик, основанный на поляризационно-зависимом поглощении графена.

Две полезные и занимающие особое место области исследования-графен и плазмоника. Очень плотно прилегают друг к другу. Не только отдельные плазмоны графена, но и их регулируемая и относительно низкая дисперсия, а также сочетание графена с наноструктурами драгоценных металлов обещают многое. Эти анализы являются интересным дополнением к плазмонике. Универсальность графена означает, что плазмоника на основе графена работает в различных частотных диапазонах и может обеспечить производство новых оптических устройств. Он также отличается беспрецедентной скоростью от терагерца до видимого света, низким напряжением, низким энергопотреблением и небольшой физической сигнатурой. В этом проекте мы рассмотрим физику графена, поляризационно-зависимое оптическое поглощение графена при полном внутреннем отражении и моделирование оптоволоконного сенсорного устройства.

ANNOTATION

This thesis diploma work considers a fiber-optic sensor based on the polarization-dependent absorption of graphene.

Two useful and prominent areas of research are graphene and plasmonics. They are very close to each other. Not only individual graphene plasmons, but also their controlled and relatively low dispersion, as well as the combination of graphene with precious metal nanostructures, promise a lot. These assays are an interesting addition to plasmonics. The versatility of graphene means that graphene-based plasmonics operate in a variety of frequency ranges and could enable the production of new optical devices. It also features unparalleled terahertz to visible light speed, low voltage, low power consumption, and a small physical signature. In this project, we will explore the physics of graphene, the polarization-dependent optical absorption of graphene with total internal reflection, and the simulation of a fiber optic sensor device.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	10
1 Графен плазмоникасы – жазық жердегі оптика. Графеннің және басқа екі өлшемді материалдардың оптикалық қасиеттері	11
1.1 Басқа екі өлшемді материалдардың оптикалық қасиеттері	13
1.2 Графан және флюорографен	15
1.3 Өзіндік графен плазмондары	17
1.4 Графендегі плазмон-электрондардың әрекеттесуі	21
1.5 Графен негізіндегі плазмоника – гибридті құрылғылар	23
2 Аспалы графендегі өте жоғары электрондардың қозғалғыштығын зерттеу	27
2.1 Поляризацияға сезімтал абсорбция әсеріне негізделген мөлдір субстраттағы графеннің қабаттарын дәл анықтау	34
2.2 Субстраттардың графеннің Раман спектріне әсері: сапфирдегі графен және шыныдағы графен	38
2.3 Оптикалық бейнелеу арқылы екі өлшемді материалдардың қалыңдығын анықтау	40
2.4 Толық ішкі шағылу кезіндегі графеннің поляризацияға тәуелді оптикалық абсорбциясы. Графенді көрінетін ету	43
2.5 Графендік фотоника және оптоэлектроника	46
2.6 Графендегі фотовольтты күшті плазмоникалық жақсарту	48
2.7 Графеннің оптикалық өткізгіштігін өлшеу	50
3 Optisystem бағдарламалық жүйесінде моделдеуді жүргізу	53
3.1 Модельдеу нәтижелері	55
Қорытынды	58
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	59

КІРІСПЕ

Графеннің толық ішкі шағылысу кезінде күшті поляризацияға тәуелді оптикалық абсорбция көрсетілген. 2,3% әмбебап жұтылу коэффициентімен салыстырғанда толық ішкі шағылысуы бар көлденең электрлік толқын үшін бір қабатты, екі қабатты және аз қабатты графендерде үлкен сіңіру байқалды. Біздің нәтиже көлденең магниттік толқынның шағылысу коэффициентінің толқындарына қатынасы графен қабаттарының саны туралы ақпаратты оңай бере алатынын көрсетеді.

Графен көрінетін спектрлік диапазонда поляризацияға тәуелді оптикалық жұтылуды көрсетеді, ол р-поляризацияланған жарыққа қарағанда s-поляризацияланған жарық үшін көбірек сіңіруді көрсетеді. Біз оны әрі қарай зерттейміз және бұл бірегей қасиет беттік плазмонды резонанстық талшықты-оптикалық сенсорға ұқсас жұмыс істейтін талшықты-оптикалық сенсорды жобалау үшін пайдаланылуы мүмкін екенін байқауға болады. Дегенмен, олар әртүрлі механизмдерге негізделген. Сандық модельдеу 5 нм графен қабаты 1700-ден 6900 нм-ге дейінгі жоғары сезімталдықпен (сыну көрсеткішінің бірлігі) ең жақсы сезу өнімділігіне қол жеткізу үшін талшықты-оптикалық сенсорға сәйкес келетінін көрсетеді.

Графеннің оптикалық және электронды қасиеттерінің байлығы үлкен қызығушылық тудырады. Графен икемділік, беріктік және қоршаған орта тұрақтылығынан басқа, жоғары ұтқырлық пен оптикалық мөлдірлікке ие. Осы уақытқа дейін негізгі назар іргелі физика мен электронды құрылғыларға аударылды. Дегенмен, біз оның шынайы әлеуеті фотоника мен оптоэлектроникада деп есептейміз, мұнда оның бірегей оптикалық және электрондық қасиеттерінің комбинациясы жолақ аралықтары болмаса да толық пайдалануға болады және дирак электрондарының сызықтық дисперсиясы ультра-кең жолақты баптау мүмкіндігіне ие. Фотоника мен оптоэлектроникада графеннің өсуі күн батареялары мен жарық шығаратын құрылғылардан бастап сенсорлық экрандарға, фотодетекторларға және ультра жылдам лазерлерге дейінгі бірнеше соңғы нәтижелерден көрінеді. Мұнда біз осы дамып келе жатқан саладағы өнердің жай-күйін қарастырамыз.

1 ГРАФЕН ПЛАЗМОНИКАСЫ – ЖАЗЫҚ ЖЕРДЕГІ ОПТИКА. ГРАФЕННІҢ ЖӘНЕ БАСҚА ЕКІ ӨЛШЕМДІ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ОПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Жалпы графенді инфрақызыл шегі бар және ультракүлгін шегі бар кезіндегі қасиеттерін қарастыратын боламыз. Бірінші кезекте инфрақызыл шегін талқылап өтейік. Графеннің көптеген ерекше қасиеттерінің ішінде ең ерекшелігі бұл материалдағы квази бөлшектер сызықтық дисперсия қатынасына бағынатындығы. Нәтижесінде, квази-бөлшектер үшін псевдоспиннің бағытын анықтайтын қосымша, хиральды симметриясы бар электрондар мен тесіктердің қозғалыс бағытына параллель немесе параллель емес болып қарастырылады. Сызықтық спектр мен хирургия электронды және оптикалық қасиеттерге тікелей және басым әсер етеді, бұл екі өлшемді Кристаллда мұндай квази бөлшектерді локализациялау мүмкін емес, кедергі түзетулері өткізгіштік оң(әлсіз локализация), ал графеннің оптикалық өткізгіштігі тұрақты және энергияға тәуелсіз болады. Сонымен қатар, оптикалық өткізгіштіктің де бар екенін көрсету оңай материалдың қандай да бір параметрлеріне тәуелді емес екендігі байқалады. $s = \rho e^2 / (2h)$ (мұнда e -электронның заряды, ал h -Планк тұрақтысы), сондықтан оптикалық абсорбция тек жұқа құрылымның тұрақтысына байланысты: $\pi\alpha$ 2,3% (1.1a-суретте көрсетілген). Бір қызығы, оптикалық өткізгіштік жақын, бірақ баллистикалық режимде тұрақты токтың өткізгіштігіне тең емес екендігі $4e^2/(\pi h)$. [1]

Мұндай қарапайым әрекет нөлдік температурада қосылмаған үлгілер үшін күтіледі. Сонымен қатар, графенді химиялық немесе электростатикалық жолмен допингтеу қабілеті көптеген графенге негізделген құрылғылардың негізінде жатыр және мұндай допинг оптикалық қасиеттерге өте күшті әсер етеді. Паули блоктауы (1.1 б-суретте түсіндірілген) энергиясы $2E_f$ -ден аз фотондардың жұтылмауын қамтамасыз етеді (E_f – электрондар немесе тесіктер үшін Ферми энергиясы) (бұл жерде валенттілік пен өткізгіштік жолақтар арасындағы асимметрияны қарастырмаймыз).[2]

Бұл «Есептелмеген» спектрлік салмақты қосынды ережесі арқылы нөлдік жиіліктегі айқын Друд шыңына байланыстыруға болады. Дегенмен, Паули блоктау энергияларының үстінде жұтылу әлі де қарапайым $\pi\alpha$ қатынасымен беріледі. Дисперсия қарапайым сызықтық мінез құлықтан ауытқып кеткен кезде энергия жағдайында пайдасы аз болады, ол анизотропты (тригональды қисықтық) және сублинеяға айналады. Дегенмен, тіпті көрінетін диапазонның ішінде оптикалық жұту әлі де $\pi\alpha$ -ға жақын, сондықтан оптикалық жұтылу 3эВ кезінде де 3% -дан аз (1.1 а-суретті қараңыз).[1]

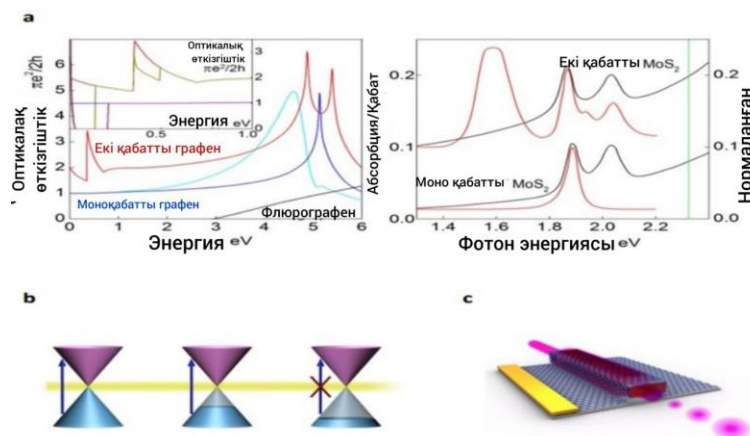
Графеннің бұл қасиеті өте төмен парак төзімділігімен (қоспаланған үлгілерде $100\Omega/\text{кв}$ төмен болуы мүмкін) графен мөлдір және өткізгіш қабаты қажет болатын бірқатар қолданбалар үшін өте перспективалды материал ретінде қарастырылуының себебі болып табылады (сенсорлық экрандар, сұйық кристалды дисплейлер, 3 органикалық жарық диодты дисплейлер, күн батареялары және т.б.). Бұл қолданбаны дамыту арқылы қатты электролитпен вентильдеу $E_F \sim 1\text{eV}$ -ке айналатын 10см^2 -ге дейінгі тасымалдаушы концентрациясына қол жеткізуге мүмкіндік берді, сондықтан модуляция көрінетін спектрде оптикалық беріліс болуы мүмкін. Графенді кремний толқын өткізгіштерімен біріктіру кең жолақты графен негізіндегі біріктірілген толқын өткізгішін шығаруға мүмкіндік береді. 1.1 с-суретте оптикалық модулятор көрсетілген. Сонымен келесі ультракүлгін шегі және экситоникалық әсерлері қарастырайық.[4]

Сызықтық дисперсиядан 3 эВ-тан жоғары ауытқулар және тригональды деформация әсерлері өте күшті болады. Графеннің аймақтық құрылымы оның Бриллюэн аймағының m нүктелерінде Седла нүктелері бар, бұл ван Хоув сияқты ерекшеліктерге әкеледі. Бір электронды жуықтауда бұл 5,2 эВ шамасында күшті жұтылу шыңына (10%-дан жоғары – атомдардың бір қабаты үшін өте маңызды сан) әкелуі керек. Іс жүзінде бұл қарапайым тұжырым сәтсіздікке ұшырайды және шыңы 4,5 эВ-ке жақын байқалады (1.1а-суретті қараңыз). Абсорбциялық спектрдегі күшті өзгерістер негізінен, резонанстық қоздырғыштармен байланысты.[4]

Магниттік өрістегі графен туралы айта кетсек. Графеннің сызықтық спектрі және үлкен Ферми жылдамдығы бөлме температурасында кванттық Холл эффектін байқауға әкеледі. Тұрақты токтағы Холл эффектінң аналогы болып табылатын оптикалық эффект өлшемдерін - поляризацияның Фарадей айналуы деп атауға болады. Графеннің қалыңдығы бір атом болса да, бірнеше Тесланың қарапайым магнит өрістерінде шамамен 6 градусқа жуық өте үлкен Фарадей айналуы бар екені көрсетеді. Бұл магниттік-оптикалық құрылғыларда графенді пайдалану мүмкіндігін ұсынады.[5,6]

Керілген және қисық графен. Осы уақытқа дейін біз екі өлшемді электронды жүйе ретінде негізінен графенге шоғырландық. Дегенмен, бұл материал созуға, қысуға, бүктеуге және т.б. болатын шынайы атомдық мембрана болып табылады. Қисықтықты сырттан басқаруға болатындықтан, графен жай геометриялық әсерлерге байланысты бейімделгіш линза ретінде пайдаланылуы мүмкін. Сондай-ақ графеннің электронды қасиеттері жергілікті штаммға қатты тәуелді екендігі теориялық және эксперименттік түрде көрсетілді. Жақында графеннің оптикалық қасиеттерін қолданбалы штамм арқылы өзгертуге болады деп болжануда. Мысалы, бір осьті деформация жағдайында күшті дихроизм табылды, сондықтан сіңіру коэффициенті түсірілген деформацияға қатты тәуелді болады және бір осьті деформацияның салыстырмалы бағытына және түсетін жарықтың

поляризациясына байланысты өзгереді. Төтенше поляризация бұрыштарында оптикалық жұтуды $\alpha(1+4e)$ түрінде көрсетуге болады, мұндағы e – бір осьті деформация. Әсер ультракүлгін сәулелер үшін одан да күшті, өйткені ван Хове сингулярлықтары 10% штамм үшін 1 эВ-тан астамға ауысады (1.1а-суретте көрсетілген).[7]



1.1 Сурет - Жазық оптиканың құрылыс блоктары

а - сол жақтағы график: таза графеннің оптикалық өткізгіштігі (көк және көгілдір сызықтар – электронды-электрондық әрекеттесулері бар және жоқ кезі), таза екі қабатты графен (қызыл сызық), қоспаланған екі қабатты графен (қызғылт сызық), қоспаланған екі қабатты графен (қара сызық) және флюорографен (қара сызық).

Кірістірілген спектрдің төмен энергия диапазонында үлкейтуді көрсетеді.

а - оң жақтағы график: молибден дисульфидінің бір және қос қабатының жұтылу спектрлері (сол жақ ось, қабаттар саны бойынша нормаланған, қара сызықтар) және сәйкес PL спектрлері (оң жақ ось, А шыңының қарқындылығымен нормаланған, қызыл сызықтар). Түсінікті болу үшін спектрлер тік ось бойымен жылжытылады.

Жасыл сызық қозу толқын ұзындығының спектрлік орнын көрсетеді.

б - суретінде Паули графендегі фотонды сіңіруді блоктау.

с - суретінде бейімделген графен негізіндегі толқын өткізгішпен біріктірілген оптикалық модулятордың эскизі.

1.1 Басқа екі өлшемді материалдардың оптикалық қасиеттері

Бірқатар тривиальды емес, қызықты және пайдалы графеннің тағы бір қасиеті бар, ол жиі назардан тыс қалады, ол басқа екі өлшемді кристалдар мен осындай кристалдарға негізделген гетероструктураларды ашуға және зерттеуге мүмкіндік беретін шлюздерді ашты. Шынында да, соңғы бірнеше жылда екі өлшемді материалдарының үлкен саны қарқынды түрде зерттелді және олардың оптикалық қасиеттері қызықты және көбінесе үш өлшемді негізгі материалдарының қасиеттерінен ерекшеленеді. Қазіргі уақытта графеннің әртүрлі модификацияларынан (екі қабатты, үш қабатты, химиялық функционалдық графен) дихалкогенидтер мен күрделі оксидтер сияқты күрделі материалдарға

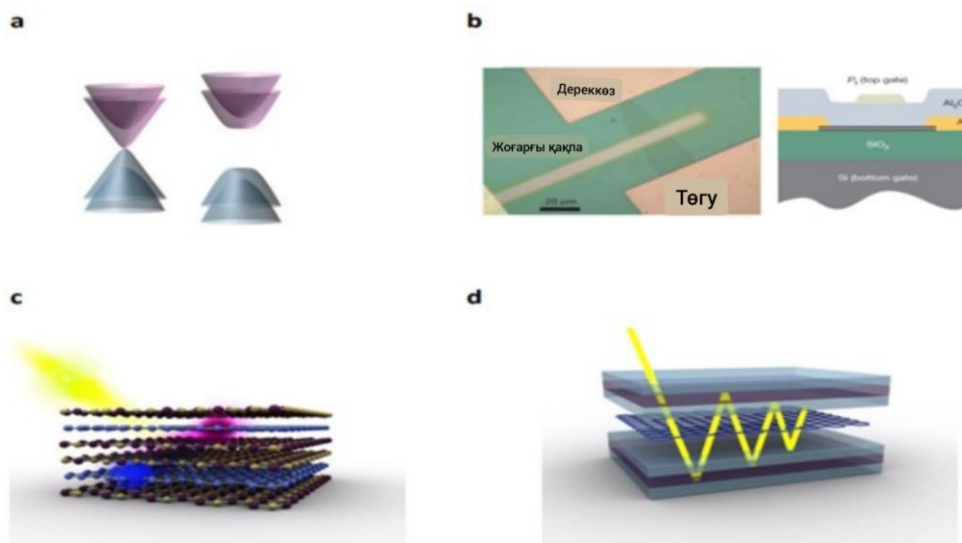
дейінгі екі өлшемді кристалдарының өте үлкен әртүрлілігі бар. Осы кристалдардың бірнешеуінің оптикалық қасиеттері бүгінгі күнге дейін зерттелгенімен, бұл болашақта үлкен зерттеу саласына айналатыны анық.[8]

Екі және үш қабатты графен. Бақыланатын диапазонды және бақыланатын оптикалық сіңіруі бар материал. Екіқабатты графеннің электрондық құрылымы моноқабаттан күрт ерекшеленеді, сондықтан оны жеке екі өлшемді материалы ретінде қарастыруға болады. Шынында да, А-В (Бернал) қабаттастырылған графеннің жолақ құрылымы параболалық дисперсиясы бар және нөлдік энергияда жанасуы бар валенттілік және өткізгіштік жолақтарымен әлі де байланыстырылмаған. Ол сондай-ақ бірінші жуықтауда нөлдік энергиядан $1/1 = 0,4$ эВ (қабаттар арасындағы ең жақын көрші) ығыстырылатын қосымша ішкі жолақтарды қамтиды. Оптикада бұл осы энергияда күшті сіңіру шыңына әкеледі (1.1а-суретте көрсетілген).[2]

Моно және екі қабатты графендердегі бос спектрлер ішкі торлар арасындағы симметриямен қорғалған. Дегенмен, қос қабатты мұндай симметрия екі қабат арасындағы симметрияны да білдіреді және қабаттардың біреуін селективті химиялық қоспалау арқылы немесе көлденең электр өрісін (қақпаны) қолдану арқылы оңай көтерілуі мүмкін, бұл айтарлықтай саңылаулардың ашылуына әкеледі. Шынында да, мұндай алшақтық осы материалдағы оптикалық эксперименттерде байқалды және ұқсас әсерлер 0,4 эВ шамасында оптикалық спектрдегі күшті өзгерістерге де жауап береді. Бұл әсерлерді телекоммуникацияда оптикалық модуляция үшін қолдануға болады деп ұсынылды. 1.2а-суретте қос қабатты графеннің энергетикалық спектрі және 1.2б-суретте қос қабатты графендегі реттелетін жолақ аралығына негізделген тиімді оптикалық модулятор көрсетілген.[9]

Үш қабатты графен - бұл екі түрлі конфигурацияда келетін тағы бір қызықты материал. Бернал жинақталған электрондық құрылымын (А-В-А) моно және екі қабатты графен парақтарының комбинациясы ретінде қарастыруға болады. Сонымен қатар, ромбоэдрлік (А-В-С қабаттастырылған) үш қабатты графен екі қабатты графенге көбірек ұқсайды. Нәтижесінде екеуінің де оптикалық қасиеттері перпендикуляр электр өрісіне қатты тәуелді, А-В-С үш қабаты А-В-А-ға қарағанда үлкен жолақ саңылауын көрсетеді.[8]

Бұл материалдағы ван Хове сингулярлықтары қос қабатты графенге қарағанда күштірек болғандықтан, оптикалық жұтудағы өзгерістер де реттелетін жолақ аралығын қажет ететін қолданбалар үшін қызықты болуы мүмкін(1.2 с – суретте көрсетілген).[9]



1.2 Сурет - Көпқабатты жазық оптика

- а - суретінде таза және қоспаланған қос қабатты графеннің энергетикалық спектрі көрсетілген.
 б – суретінде қос қабатты графендегі реттелетін жолақ аралығына негізделген оптикалық модулятор көрсетілген.
 с - зарядтың тік бөлінуі бар гипотетикалық көпқабатты құрылым көрсетілген.
 д - қуыс негізіндегі графен фотодетекторы және графен негізіндегі интеграцияланған интерферометр көрсетілген.

1.2 Графен және Флюорографен

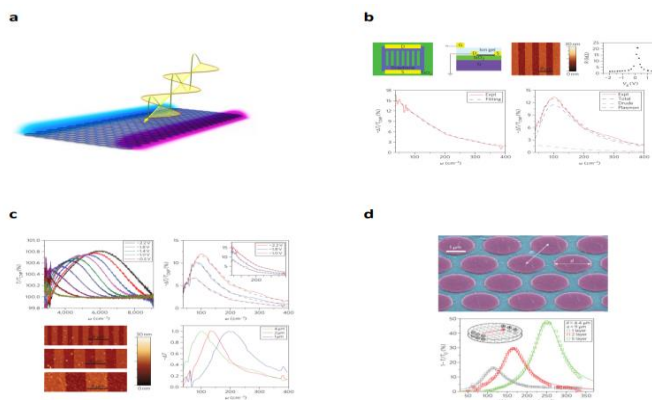
Графенді химиялық реакцияларға ұшырауы мүмкін алып хош иісті молекула ретінде де қарастыруға болады. Шынында да осындай екі химиялық модификация алынады: графан (көміртегі атомдарының әрқайсысына сутегі атомы қосылған кезде) және флюорографен (немесе әрбір көміртегі атомына бір фтор атомы қосылған 2D тефлон). Ковалентті байланысқан сутегі немесе фтор көміртегі атомдарының гибридтенуін sp^2 -ден sp^3 -ке өзгертеді, бұл электронды жолақ құрылымынан π орбитальдарын жояды. Бұл σ жолақтары арасындағы бөлу ретінің үлкен саңылауының ашылуына әкелуі керек. Эксперименттік түрде флюорографен үшін 3 эВ ретті оптикалық саңылаулар байқалды (1.1a-суретте көрсетілген). Бұл бәлкім ақаулардың көп болуын көрсетеді. Бұл 2D кристалдарының оптикалық қасиеттерін материалдарды химиялық модификациялау арқылы өзгертуге болатынын көрсетеді.[2]

Екі өлшемді атомдық кристалдар және олардың гетероқұрылымдары:

Бір қабатты молибден дисульфиді графеннен кейінгі ең көп зерттелген екі өлшемді материал болуы мүмкін. Синтетикалық және табиғи кристалдардың екеуі

де қол жетімді болғандықтан, MoS2 механикалық және сұйық фазалық қабыршақтану арқылы бір қабатты күйге дейін қабыршақтанды. Бір таңғаларлығы, MoS2 моноқабатының қасиеттері үш өлшемді материалының қасиеттерінен түбегейлі ерекшеленеді. Көлемді кристалдарда 1,29 эВ ретті жанама жолақ саңылаулары бар. Екі өлшемді күйінде MoS2 Брилуен аймағының К нүктелерінің айналасында 1,9 эВ тәртібіндегі тікелей жолақ саңылауын көрсетеді, бұл люминесценцияның күшті өсуіне әкеледі (1.1a-суретті қараңыз). Инверсиялық симметрия, күшті спин-орбиталық әрекеттесу К және К' нүктелеріндегі валенттік жолақтарды шамамен 0,16 эВ-қа бөледі. Сонымен қатар, уақыттың кері симметриясы бұл бөлінудің екі аңғарда қарама-қарсы бағытта болуын қамтамасыз етеді, бұл К және К' аңғарларында қарама-қарсы спиннің поляризациясына әкеледі. Бұл оптикалық бақылауға (дөңгелек поляризацияланған жарық арқылы) тиімді мүмкіндік береді «валлейтрониканы» жүзеге асыруға әкелетін әр алқапта жеке заряд тасымалдаушылардың популяциясы болады.[10]

Қазіргі уақытта басқа екі өлшемді кристалдарының (BN, TaS2, NbSe2, WS2 және т.б.) электрондық және оптикалық қасиеттері қарқынды түрде зерттелуде. Дегенмен, осындай екі өлшемді кристалдарын бірінің үстіне бірін қою арқылы жасалған гетероструктуралардан көбірек тосын сыйлар күтуге болады. Тіпті ең қарапайым стектердің өзі жаңа физиканы ашты және кейбір қолданбаларда төңкеріс жасай алады. Бұл гетероқұрылымдардың оптикалық қасиеттерін өте дәл анықтауға болады, өйткені өте әртүрлі жолақ аралықтары мен қалыңдығы бар материалдарды біріктіруге болады(1.2с-суретті қараңыз). Атап айтқанда, мұндай гетероқұрылымдарды фототексеру, күн жинау, оптикалық сигнал модуляциясы және т.б. үшін пайдалануға болады. Тағы бір бағыт графен гетероқұрылымдарын стандартты оптикамен (мысалы, оптикалық қуыстар) және оптоэлектронды құрылғылармен (мысалы, біріктірілген интерферометрлер) біріктіру болып табылады. (1.3д - суретте көрсетілген).[9]



1.3 Сурет - Өзіндік графен плазмондары

а - плазмонның қозуының схемасы.

б - жабық графен микро-таспа массивтеріндегі плазмонды резонанс. Жоғарғы, солдан оңға қарай: типтік графен микро-таспа массивінің үстінгі және бүйірлік көріністері, графен микро-таспа массивінің үлгісінің AFM кескіні, осы графен микро-лента массивінің қақпаға тәуелді электрлік кедергісі. Төменгі жағында: трансмиссия спектрлерінің қақпадан туындаған өзгеруі.

с - электрлік қақпа және микро-таспа ені арқылы плазмонды резонансты бақылау.

Жоғарғы: қақпа кернеуінің функциясы ретінде спектрлер.

Төменгі жағында: үлгілердің AFM кескіндері, сол жақта, бірдей қоспа концентрациясы үшін сәйкес үлгілер үшін жіберу спектрлері.

д - плазмоникалық мөлдір графен құрылғылар.

Жоғарғы: жинақталған графен/изоляциялық микродиск массивінің SEM кескіні (жалған түс). Төменгі жағында: бір, екі және бес графен қабаттары бар жинақталған плазмоникалық құрылғыларда берілістің жойылуы.

1.3 Өзіндік графен плазмондары

Плазмондар – көптеген металдар мен жартылай өткізгіштерде болатын электрон сұйықтығының жоғары жиілікті ұжымдық тығыздық тербелістері ретінде қарастырылады. Өзіндік графен плазмондары асыл металдардағы плазмондардан керемет ерекшеленеді, өйткені оларды қақпақпен немесе допингпен баптауға болады. Үлкен Омдық шығындарды көрсетпейді және қатаң аймақтармен шектелуі мүмкін. Графеннің плазмоникалық резонанстары отандық қауіпсіздік үшін маңызды Терагерц (THz) сәулеленуінің берік және арзан фотодетекторларын жүзеге асыруда шешуші рөл атқара алады. Біз таза графен парағындағы электронды газдың меншікті плазмондық режимдерінің ерекше қасиеттерін қарастырамыз. Біздің назарымыз легирленген үлгілердің плазмондарына бағытталған. Дегенмен қосылмаған графен үшін қызықты ұжымдық режимдер де болған. Сонымен қатар, біз бойлық режимдерге, яғни байланысты электр өрісі q толқын векторына параллель болатын режимдерге тоқталамыз. Графендегі көлденең ұжымдық режимнің болуы (жиілігі жолақ аралық сіңіру үшін Паули-блоктау шегінен сәл төмен) талқыланды.[1]

Екі өлшемді электронды плазма:

Екі өлшемді электронды жүйелер (2DESs) қырық жылдан астам уақыт бойы қызықты физиканың құнарлы көзі болды. Кез келген 2DES сияқты, графендегі электрондар тәуелсіз бөлшектер ретінде қозғалмайды. Керісінше, олардың қозғалыстары жұптық өзара әрекеттесулердің арқасында жоғары корреляцияға ие. Бұлар $u(r_{ij}) = u(|r_i - r_j|)$ потенциалымен сипатталады, ол тек екі электрон арасындағы $r_{ij} = r_i - r_j$ салыстырмалы қашықтықтың абсолютті мәніне ғана тәуелді. Өзара әрекеттесу потенциалы графен парағын қоршап тұрған диэлектрлік ортаға сезімтал болады. Бір жағы диэлектрлік өтімділігі ϵ_1 , ал екіншісі диэлектрлік өтімділігі ϵ_2 болатын ортаға әсер еткен графен үшін бізде: $u(r) = e^2 / (\epsilon r)$ мұндағы $\epsilon = (\epsilon_1 + \epsilon_2) / 2$ (Фурье түрлендіруі $u_q = 2pe^2 / (\epsilon q)$ болатындай). Графен

парағындағы электронды газды келесі континуум-модель Гамильтониан арқылы төмен энергияларда сипаттауға болады:[4]

$$\hat{H} = v_F \sum \sigma \cdot p + \frac{1}{2} \sum \frac{e^4}{\varepsilon |r_i - r_j|}, \quad (1.1)$$

мұндағы $v=10^6$ м/с-Дирак жылдамдығы, $p = -i\tilde{\nabla}$ -мен қосыламын-І-ші электронның канондық импульсі, ал $\sigma = (s_x, s_y)$ - Паули матрицаларының екі өлшемді векторларындағы сандар (x, y) . Қарапайым болу үшін (1) теңдеу Массасыз Фермион Дирактың (МФД) бір арналы моделі үшін жазылды, яғни берілген спин және алқап индекстері бар электрондарға қатысты. Электрон-электронды өзара әрекеттесудің салыстырмалы маңыздылығы Екінші мүшенің шамасы арасындағы бірінші мүшенің шамасына қатынасы арқылы анықталады. Легирленген графен парағы үшін электрондар арасындағы әдеттегі қашықтық Ферми толқындарының санына, яғни $k \approx 1$ - ге кері тәртіпте болады . Осылайша, екінші мүшенің $e^2 k / \varepsilon$ реті бар . Кинетикалық энергия $v_F k_F$ ретіне ие, сондықтан осы екі шаманың арақатынасы өлшемсіз параметрді анықтайды, әдетте "графеннің жұқа құрылымының тұрақтысы"деп аталады:[4]

$$\alpha_{ee} = \frac{e^2}{\varepsilon v_F}. \quad (1.2)$$

Жіңішке құрылымның тұрақтысын қолдана отырып өрнектелуі мүмкін екенін көру оңай $E_2 / (c \cdot \text{ке дейін})$ 1 с-қа сәйкес келеді . Бұл бізге жылдамдықты тез бағалауға мүмкіндік береді, мысалы, α_{ee} бар графен үшін v_{ee} бір жағынан ауа әсеріне ұшырайды ($\alpha_{ee} = 1$), ал екінші жағынан-2 siO ($1-3.9$), біз 0.9. Графеннің ілулі парағы үшін $\alpha_{ee} = 1$ жән α_{ee} 2.2-ші жол. Осылайша, α_{ee} -ның жұқа құрылымының графенін қоршаған ортаның диэлектрлік өткізгіштігін өзгерту арқылы эксперименталды түрде реттеуге болады. Осы талдаудан біз, ең болмағанда, легирленген графен парағындағы электрондар бір-бірімен өте қатты әсер етеді және осы материалдағы өзара әрекеттесу эффектілері өте мұқият талдануы керек деп тұжырымдаймыз.[4]

Екі өлшемді плазмондар теориясы: Плазмондардың физикалық шығу тегін келесідей түсінуге болады. Электрондар электр өрісін экрандау үшін қозғалғанда, олар белгіден асып кетуге бейім, 1.3а-суретті қараңыз.[11] Содан кейін олар зарядтың бұзылуына қарай тартылады және әлсіз сөнген тербеліс орнатып, қайтадан асып түседі. Тербеліске жауап беретін қалпына келтіру күші барлық электрондар жасаған өздігінен үйлесімді өрістің градиентіне пропорционал. 2DES-тегі плазмонның дисперсиясын, кем дегенде, ұзын толқын ұзындығы $q \ll k_F$ шегінде оңай түсінуге болады. Бұл шекте макроскопиялық сақталу заңдарына бағынатын екі ұжымдық айнымалыны енгізетін электрон динамикасының

макроскопиялық сипаттамасын қолдануға болады: электрон тығыздығының $\delta n(r, t)$ ауытқуы және онымен байланысты ток тығыздығы $\delta j(r, t)$. үшін $|\delta n / n| \ll 1$ плазмандар сызықтық Эйлер қозғалыс теңдеуімен сипатталады.

$$\frac{dj(r,t)}{dt} = -\frac{D}{\pi e^2} \nabla_r \int d^2r' \frac{e^2}{\varepsilon|r-r'|} \delta n(r', t), \quad (1.3)$$

бұл үздіксіздік теңдеуімен бірге $\delta n(r, t)$ Фурье компоненті үшін келесі теңдеуге әкел

$$\left(\omega^2 - \frac{D}{\pi e^2} q^2 u_q \right) \delta n(q, \omega) = 0, \quad (1.4)$$

Мұндағы D – «Друд салмақ» деп аталады. Төртінші теңдеуге назар аударатын болсақ, жиілігі друд салмағы арқылы берілген нәтижеге тең болатын плазмандардың болуын білдіреді. $\omega_{pi}(q) \propto q$, екі өлшемді плазмандық тербелістердің ерекшелігіне назар аударыңыз. Массасы m_b болатын қарапайым параболалық жолақты фермиондар үшін Друд салмағы $D = \pi e^2 n / m_b$ арқылы берілген және бізде белгілі нәтиже бар. Графендегі МФД үшін жағдай мүлдем басқаша болып шықты. Өзара әрекеттеспейтін МФД массасының друд салмағы $D_{\text{МФД}} = 4E_F \sigma_{\text{uni}} / \hbar$ арқылы беріледі, ол қоспаланған графендегі плазмон жиілігін береді $E(q) = \hbar \omega(q) < 2E_F$.

$$\omega_{pi}(q) = \sqrt{\frac{8E_F \sigma_{\text{uni}}}{\hbar \varepsilon}} q. \quad (1.5)$$

Дирак плазманының жиілігі осылайша $E^{1/2} \propto n^{1/4}$ масштабталады және Планк тұрақтысын қамтиды. $E(q) > 2E_F$ үшін жолақаралық ауысулар графен плазмандарын күшті диссипативті етеді. Әдеттегі қоспалау үшін $n = 10^{11} \text{ см}^{-2}$ графендегі Ферми энергиясы $E_F \sim 37 \text{ меВ}$ және $q = 0.1 k_F \sim 0.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ кезінде SiO2-дегі графен үшін плазмон энергиясы шамамен 16 меВ, бұл инфрақызыл диапазондағы көрсеткіші.[4]

Бесінші теңдеуді қорытындай келе плазманның беттік толқын ұзындығының қоздыру толқын ұзындығынан қысылуының жұқа құрылым тұрақтысымен реттелетіндігі және $\lambda / \lambda_0 \approx 2\alpha E_F / (\varepsilon \hbar \omega) \ll \alpha$ болғандықтан күшті болуы мүмкін екендігі көрінеді. $F=q\hbar$ болғанда, гидродинамикалық тәсіл плазма дисперсиясының қатынасын сандық түрде сипаттауға аса қатты ынталы емес. Плазмандық режимдердің толық кванттық-механикалық есебінің негізгі ингредиенті реттелген (немесе себепті) тығыздық жауап функциясы $\chi(q, \omega)$, ол Кездейсоқ фазалық жуықтау (КФЖ) шеңберінде және сызықтық жауап теориясы

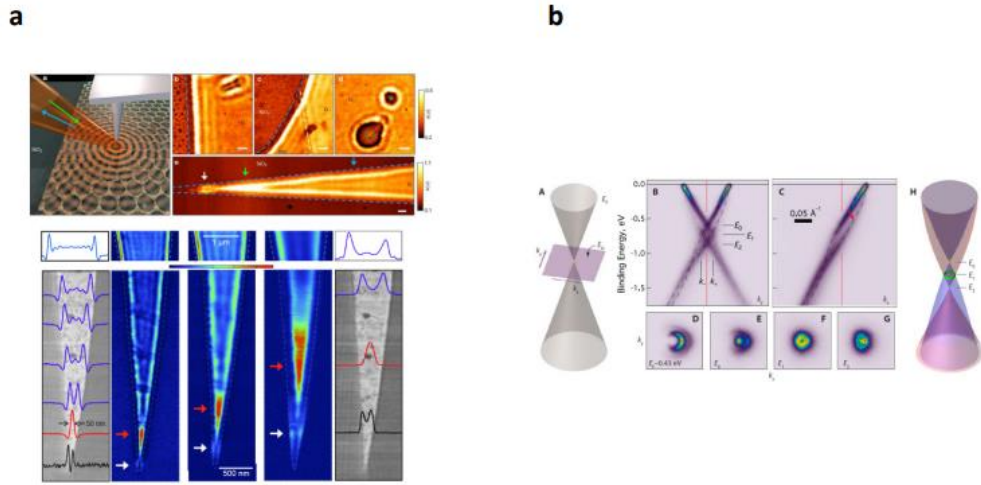
$\chi^{RPA}(q, \omega) = \chi^{(0)}(q, \omega) / \epsilon(q, \omega)$ КФЖ $\chi^{(0)}(q, \omega)$ арқылы берілген, мұндағы $\epsilon(q, \omega)$ – жақсы белгілі жауап функциясы және $\chi^{(0)}(q, \omega)$ КФЖ динамикалық диэлектрик функциясы болып табылады. $\chi^{(0)}(q, \omega)$ функциясы әдетте «Линдхард функциясы» деп аталады. КФЖ соңғы эксперименттер көрсеткендей дәл емес екенін ескеріңіз. Дисперсиялық қатынасқа түзетулер (5) сілтемеде келтірілген. Осы уақытқа дейін біз қоспаланған графен парақтарындағы плазмондарды нөлдік температурада және бұзылуларсыз талқыладық. Ақырғы температура және ретсіз әсерлер сәйкесінше ақырғы температурада және релаксация уақытының жуықтауында сәйкесінше Линдхард функциясын қолдану арқылы КФЖ теориясына оңай енгізілуі мүмкін. Біздің білуімізше, қоспаланған графен парағындағы ішкі плазмонның өмір сүру ұзақтығы әлі есептелмеген.[5]

Дирак плазмондарына металл қақпаға байланысты скринингтің әсері: Дирак-плазмон дисперсиясына металл қақпа арқылы скрининг әсерін қысқаша талқылайық. (5) қоспаланған графен теңдеуін қарайтын болсақ. Графен парағы мен металл арасындағы будандастырудың әсерін елемей, біз металды графендегі электрондар арасындағы кулондық өзара әрекеттесулерді скринингтік негізде $u_d \rightarrow U_d(q) = 2\pi e^2(1 - \exp(-2qd)) / q$ ауыстыруға әкелетін жерлендірілген өткізгіш ретінде сипаттай аламыз. $U_d(q)$, мұндағы d – графен мен қақпа арасындағы қашықтық. $U_d(q)$ $q=0$ кезінде дұрыс болғандықтан, $\Omega_{ac}(q \rightarrow 0) = c_s q$ бар “экрандалмаған плазмоннан” (5) гөрі саңылаусыз акустикалық плазмонды $\omega_{pl}(q) \propto$ күтеміз. c_s үшін дәл өрнек.[4]

Графендегі меншікті плазмондардың тәжірибелік бақылауларына тоқталсақ. 2DES-дегі плазмондарға әртүрлі тікелей және жанама әдістермен қол жеткізуге болады, соның ішінде оптикалық өлшеулер, электронды энергияны жоғалту спектроскопиясы (ЭЭЖС), серпімді емес жарық шашырауы, бұрышпен шешілетін фотоэмиссиялық спектроскопия және сканерлеуші туннельдік спектроскопия. Қабыршақталған графен парақтарында және эпитаксиалды графен үлгілерінде бірнеше ЭЭЖС эксперименттері жүргізілді, бұл SiC-тегі графендегі Дирак плазмондары SiC субстратының беткі-оптикалық фондарымен күшті гибридтелгенін көрсетті. Дирак плазмондары сонымен қатар олардың инфрақызыл сәулеге қосылуын бірнеше қызықты тәсілдермен тікелей инженериялау арқылы зерттелді.[1]

Қақпаларды қолдану арқылы плазмон жиілігін оңай өзгерту мүмкіндігі маңызды әрекеттер қатарына кіреді. Дегенмен, Дирак плазмондары басқа себептермен де қызықты. Дирак-плазмон дисперсиясы ұзақ толқын ұзындығы шегінде де алмасу және корреляция әсерлеріне байланысты ренормалануларға ұшырайды. Дирак плазмонды беттік ғылым әдістерін қолдану арқылы манипуляциялануы мүмкін. Дирак плазмондарын жарыққа қосу оңай, егер соңғысы мен біріншісі арасындағы импульстің сәйкессіздігі жеткілікті «өткір» нысанмен өтелсе(периодтық үлгі, АФМ зондының ұшы, наносөлшемді ақау және

т.б.). Дирак плазмондарының қызмет ету мерзімі металдардағы немесе жартылай өткізгіштердегі плазмондарға қарағанда әлдеқайда ұзағырақ болады деп болжанады(1.4 – суретте көрсетілген).[6]



1.4 Сурет - Графен плазмондарын іске қосу және бейнелеу

а - жоғарғы сол жақта: инфрақызыл нано-бейнелеу экспериментінің схемасы. Көк және жасыл көрсеткілер сәйкесінше кіріс және кері шашыраған жарықты белгілейді.

Жоғарғы оң жақта: графен жиектеріне (көк үзік сызықтар), ақауларға (жасыл үзік сызықтар) немесе бір қабатты және екі қабатты графен арасындағы шекараларға (ақ сызықша) жақын әртүрлі кедергі үлгілерінің суреттері. Төменгі жағында: шашырау эксперименттерінде плазмонның толқын ұзындығын бақылау.

б - SiC бойынша графеннің ARPES спектріндегі плазмон спутниктік жолақтары. (А) Өзара әрекеттеспейтін суреттегі графеннің Дирак энергетикалық спектрі. (В және С) К бағытына перпендикуляр және параллель легирленген графеннің тәжірибелік спектрі. Үзік сызықтар байқалған тесік пен плазмон жолақтарының дисперсиясына бағыттаушы болып табылады. Қызыл сызықтар $k = 0$ -де. (D-ден G) Әртүрлі байланыс энергияларындағы спектрлік функцияның тұрақты энергиялық үзілімдері. (H) Электрон-электрондық әрекеттесулер болған кездегі Дирақтың схемалық спектрі.

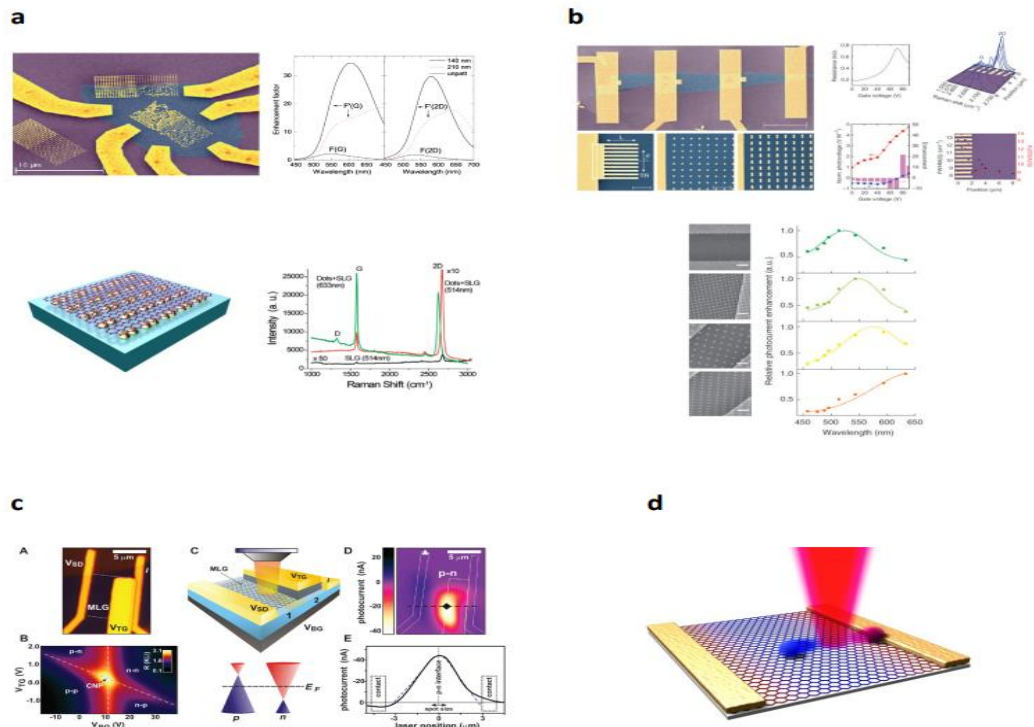
1.4 Графендегі плазмон-электрондардың әрекеттесуі

МДФ-ның өзара әрекеттеспейтін газының бөлшектесігі континуумы Линдхард функциясының ойдан шығарылған бөлігімен ұсынылған (қоспаланбаған MDF жүйесі үшін)

$$\text{Im} \left[\chi_{nn}^{(0)}(q, \omega) \right] \Big|_{\text{undoped}} = -\frac{q^2}{4\hbar} \frac{\theta(\omega - v_F q)}{\sqrt{\omega^2 - v_F^2 q^2}}. \quad (1.6)$$

Мұндағы негізгі белгілер «жарық конусының» $\omega^2 - v^2 q^2^{-1/2}$ жанында пайда болатын $\omega = v q$ дивергенциясы және $q < k_F$ жолақ аралық бөлшек-тесігінің төменгі шегіндегі салыстырмалы түрде әлсіз салмақ континуумы. Дивергенция MDF сызықты дисперсиясынан туындайды, ол барлық k үшін $F=vq$ мәніне максималды жолақ ішілік бөлшектер саңылауының қозу энергиясын орналастырады. Дирак теңізінің плазмондық қозуы тіпті ол жолақ аралық бөлшектер тесігі континуумына енген кезде де өте жақсы анықталған. Квазибөлшектер мен плазмандар арасындағы өзара әрекеттесу қарапайым релятивистік емес 2DES-ке қарағанда екі өлшемді MDF жүйесінде күштірек.[8]

Қоспаланған графен парағында динамикалық экрандалған КФЖ әрекеттесуін $W(q, \omega) = \epsilon_q / \epsilon(q, \omega)$ ескеру қажет. Квазибөлшектердің «өзіндік энергиясын» есептей отырып, белгілі бір толқын санында жалаң квазибөлшектердің жылдамдығы плазмон тобының жылдамдығына тең және заряд тасымалдаушы квазибөлшекпен «бірге қозғалатын» (яғни, күшті байланысқан) резонансқа шашырайтынын көреміз. Бұл $\omega(q) \approx v^*(q - k)$, with $v^* > v$ кезінде орын алады, $v^* > v$ квазибөлшектердің күшейтілген жылдамдығы болып табылады. Плазмаронның ерекшеліктерін туннельдік спектроскопия арқылы да байқауға болады(1.5 – суретте көрсетілген).[8]



1.5 Сурет - Гибридті графенді плазмоникалық құрылғылар

а - жоғарғы сол: SERS үлгісінің SEM кескіндері. Жоғарғы оң жақта: G және 2D шыңдары үшін жалпы (үлгі) жақсарту факторлары. Нүктелі сызық сәйкес кедергі (үлгісіз) күшейту факторы болып табылады. Төменгі сол жақта: плазмоникалық метаматериалдың және графеннің схемасы. Төменгі оң жақта: 514 және 633 нм өлшенген алтын нанодоттардың үстіне орналастырылған графеннің Раман спектрлері.

б - жоғарғы сол жақта: плазмоникалық нанокұрылымдары бар графен фотодетекторларының SEM кескіндері. Жоғарғы оң жақта: сәйкес қарсылық және фотоэлектрлік сипаттамалар. Төменгі жағында: SEM кескіндері бар әртүрлі плазмоникалық нанокұрылымдармен және сәйкес фотожауаппен біріктірілген графен құрылғыларын пайдалану арқылы көп түсті фото анықтау. с - құрылғы геометриясы, жолақ құрылымы және графен р-п өткелінің оптоэлектрондық сипаттамалары. (А) Қос қақпалы құрылғының оптикалық микроскоптағы кескіні. (В) VSD = 1,4 мВ және T = 175 К кезінде VBG және VTG қарсы қарсылық. (С) р-п түйісуіндегі (төменгі) моноқабатты графен жолағы құрылымының эксперименттік схемасы (жоғарғы) және схемасы. (D) T = 40 К кезіндегі лазерлік толқын ұзындығы 850 нм және оптикалық қуаты = 50 мВт болатын кеңістікте шешілген фототок картасы. (E) (D) үзік сызықта түсірілген фототок сызығы.

д - металл контактілерімен легирленген графен үшін зарядты бөлу схемасы

1.5 Графен негізіндегі плазмоника – гибриді құрылғылар

Графен – әмбебап, кең жолақты, реттелетін және реттелетін оптикалық материал. Дегенмен, графеннің оптика мен фотоникада тікелей қолданылуы графеннің жарықпен салыстырмалы түрде тиімсіз әрекеттесуінен зардап шегеді. Бір атомдық қабаттың жарықты жұтуының 2,3% -ы шын мәнінде үлкен сан деп айтуға болады, бірақ тиімді оптикалық модуляторлар мен фотоэлементтерге қол жеткізу үшін графен парағындағы жарық-материяның өзара әрекеттесуін күшейту қажет. Графеннің асыл металдарға негізделген кәдімгі плазмоникамен үйлесуі зерттеудің екі саласы үшін де пайдалы болуы мүмкін.[13]

Плазмоникалық нанокұрылымдар графеннің оптикалық қасиеттерін жақсарта алады (күшті Раман қолтаңбасы, тиімдірек графен плазмоникалық фотоэлементтер) және графенді графен негізіндегі белсенді плазмоникаға әкелетін плазмоникалық наножиымдардың (оптикалық модуляторлар мен сезу үшін) оптикалық реакциясына тиімді әсер ету үшін қолдануға болады.[10]

Графендегі Раманның шашырауы плазмоникалық нанокұрылымдардың жақын өрістері арқылы жақсартылғанын аңғаруға болады. Жарықпен қоздырылған металдық нанокұрылымдар көбінесе металдың бетінде тоқтайтын зарядтар тудыратын күшті күшейтілген жақын өрістермен сипатталатын локализацияланған беттік плазмонды резонанстарды (ЛБПР) көрсетеді. Жарықтың графенмен әрекеттесуі жергілікті электромагниттік өрістермен анықталады. Графен парағында индукцияланған металл нанокұрылымдарын графенге жақын орналастыру арқылы графенмен жеңіл заттардың өзара әрекеттесуін тиімді арттыруға болады. Бұл стратегия 1.5а-суретте көрсетілгендей, Раман қарқындылығын айтарлықтай арттыру үшін металл нанодталардың ЛБПР пайдаланылған жерде қолданылды. Графен беті жақсартылған Раман спектроскопиясын зерттеу үшін тамаша прототиптік сынақ материалын қамтамасыз етеді. Оның Раман спектрі жақсы белгілі, графен үлгілері толығымен

кайталануы мүмкін және іс жүзінде ақаусыз болады. Графеннің екі өлшемді табиғаты эксперименттермен келісе отырып, электромагниттік механизмге негізделген Раманды жақсартуды жабық түрде сипаттауға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Алдын ала дайындалған плазмоникалық нанокұрылымның үстіне графенді тасымалдаудың жалпы процедурасын әзірлеу графеннің кәдімгі плазмоникадағы өрісті күшейтуді зерттеу және сандық анықтау үшін таңдаудың сынақ объектісі болуы мүмкіндігін ұсынады.[7]

Графендегі фотовольттың плазмоникалық күшеюі, плазмоникалық нанокұрылымдар арқылы жақын өрісті жақсарту графендегі фотовольтты түрлендірудің тиімділігін айтарлықтай жақсарту және көп түсті фото анықтауға мүмкіндік беретін спектрлік селективтілікке қол жеткізу үшін пайдаланылды, 1.5б-суретті қараңыз. Графен негізіндегі фотодетекторлар кванттық тиімділік және реакция уақыты бойынша тамаша сипаттамаларға ие, өйткені оның заряд тасымалдаушыларының бөлме температурасында өте үлкен қозғалғыштығы және жоғары Ферми жылдамдығы байқалады. Графеннің плазмоникалық нанокұрылымдармен үйлесуі графендік фотодетектордың жұмыс жылдамдығын төмендетпестен фотовольтты 15-20 есе арттыруға мүмкіндік береді. Айта кету керек, жарықты ағымдағы түрлендірудің нақты механизмі әлі де талқылануда. Жақында термоэлектрлік әсерлердің маңыздылығы төменгі және жоғарғы қақпа кернеулерінің функциясы ретінде алты еселенген фотовольтты үлгілердің симметриясын тікелей өлшеуде көрсетілді (1.5с-суретте көрсетілген). Бұл үлгілер фотожауаптың өлшенген кеңістіктік және тығыздығына тәуелділігімен бірге төмен температурада құрылымсыз электродтары бар қарапайым графендегі ішкі фотожауапта жергілікті емес ыстық тасымалдаушы тасымалдау басым болатынын дәлелдейді.[13]

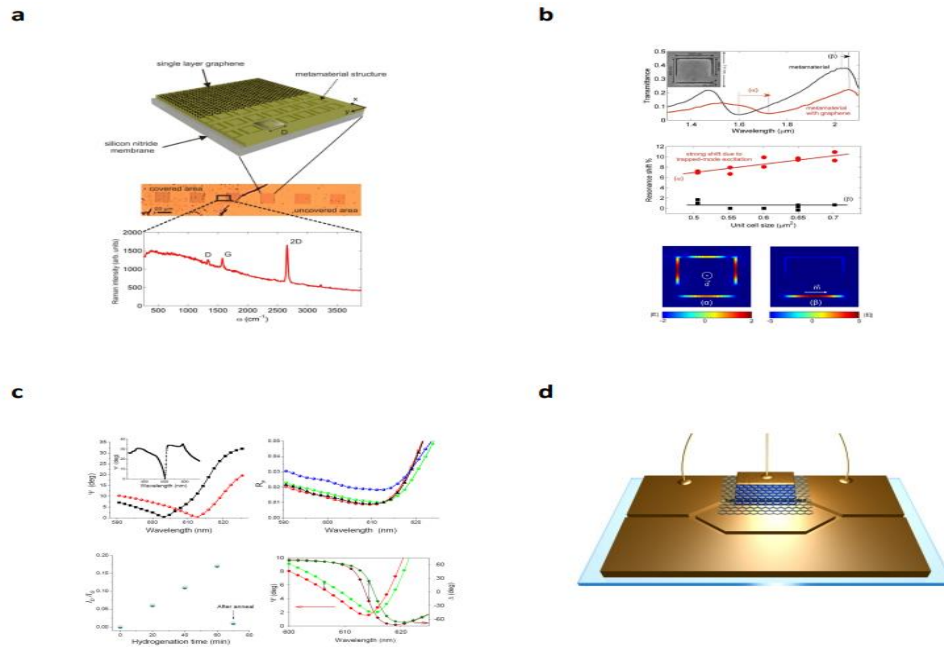
Графен мен плазмоникалық нанокұрылымдар арасындағы электрлік контактінің болуы маңызды, өйткені ол ЛБПР-тің резистивті қосылуына және графен парағын қосымша легирлеуге әкелуі мүмкін. Модуляция және сезу үшін графен негізіндегі плазмоника төңірегінді тоқтала кетейік. Белсенді плазмоника саласы үшін графеннің вентильді реттелуі өте маңызды. Белсенді оптикалық элементтер ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында барлық жерде кездесетін дисплейлерден бастап және жоғары технологиялық жиілік модуляторларымен аяқталатын үлкен маңызға ие. Оптикалық пәндердегі үлкен прогреске қарамастан, белсенді оптика әлі де қымбат емес және шағын ұяшықтардағы терең модуляцияға кепілдік беретін, бірақ айтарлықтай баяу болатын сұйық кристалдарға немесе жылдам, бірақ айтарлықтай көлемді және қымбат болатын сызықты емес оптикалық кристалдарға қатты сүйенеді. Осы себепті қымбат емес, жылдам және шағын белсенді оптикалық элементтерді дамыту айтарлықтай қызығушылық тудырады.[1]

Қазіргі таңда плазмоникалық метаматериалдар өздерін жаңа оптикалық құрылғыларды жасаудың жан-жақты құралы ретінде көрсетті. Олардың оптикалық

қасиеттерін наноматериалды құрайтын плазмоникалық нанорезонаторлар арасындағы электрлік байланысты өзгерту арқылы оңай басқаруға болады. Мұндай басқаруға қол жеткізу үшін графеннің ерекше оптикалық, электрлік және механикалық қасиеттерін пайдалануға болады. Графеннің плазмоникамен үйлесуі жылдам, салыстырмалы түрде арзан және шағын белсенді оптикалық элементтер мен нано-құрылғыларға әкелуі мүмкін. Бұл бағытта екі негізгі міндет бар: бірінші графенді плазмоникалық элементтермен біріктіру және екінші графен қасиеттерін және гибриді оптикалық құрылғылардың оптикалық реакциясын тиімді басқаруға қол жеткізу.[1]

Поликристалды Си фольгаларында графенді өсіру үшін төмен қысымды CVD процесін қолданды, содан кейін өлшемі 20м^2 болатын алдын ала дайындалған плазмоникалық метаматериалдардың үстіне графенді тасымалдау үшін PMMA ылғалды тасымалдау процедурасын қолданды (1.6а-сурет). Авторлар графен метаматериалдың плазмоникалық резонанстарының спектрлік орнын, сондай-ақ спектрлік берілістің абсолютті мәнін өзгерткенін анықтады, 1.6б-суретті қараңыз. Қарапайым ФДТД есептеулері эксперименталды деректерге жалпы қолдау көрсетті, дегенмен графеннің плазмондармен резистивті байланысы және металдың графенді қоспалау туралы мәліметтер әлі де жоқ. Механикалық қабыршақтанған графен және дымқыл ПММА тасымалдау процедурасы графенді өлшемі 200м^2 болатын кәдімгі плазмоникалық наножиымдардың үстіне орналастыру үшін пайдаланылды. Бұл плазмоникалық наножиіптерде сыртқы ортаға өте жоғары фазалық сезімталдықты көрсететін ультра тар дифракциялық байланысқан плазмондық резонанстар (немесе геометриялық резонанстар) бар. Графеннің болуы біріктірілген резонанстардың орналасуына да, үлгілердің басқа оптикалық қасиеттеріне де қатты әсер етті. Оның қасиеттерін өзгерту үшін қайтымды графенді гидрлеу орындалды, онда $0,1\text{ фг/мм}^2$ аумақтық массалық сезімталдық шегі тіркелді. Бұл беттік плазмондық резонанстық техниканың аймақтық сезімталдығынан 4 рет жақсырақ және осылайша бір молекулалы белгісіз анықтауды жүзеге асыру мүмкіндігін ашады. Жақсы анықталған 2D геометриясының және Раман көмегімен гидрлеу деңгейін бақылау мүмкіндігінің арқасында графен плазмоникалық нано-сенсорларда аймақтық массалық сезімталдықты өлшеу үшін таңдаулы сынақ объектісі болуы мүмкін.[14]

Гибриді графен/плазмоникалық элементтердің түпкілікті мақсаты графендік вентильді қолдану арқылы жарық модуляциясына қол жеткізу болып табылады, графен басқаратын гипотетикалық плазмоникалық интерферометр көрсетілген 1.6д-суретті қараңыз. Металл наноқұрылымдардың болуы электростатика мен электр разрядына байланысты вентильдер мәселесін айтарлықтай қиындатады. Гибриді плазмоникалық нано-құрылғылардағы графенді жабу мәселесі қазіргі уақытта қарқынды түрде зерттелуде(1.6 – суретте түсірілген).[14]



1.6 Сурет - Гибридті графенді плазмоникалық құрылғылар

а - жоғарғы: құрастырылған комплементарлы бөлуші метаматериалдың схемасы. Ортасында: графен тұндырылғаннан кейінгі микроскоптағы сурет. Төменгі жағында: белгіленген аймаққа сәйкес келетін Раман спектрі. б - жоғарғы: кірістірмеде көрсетілгендей $D = 711$ нм ұяшық өлшемі бірлігі үшін графеннің тұндырылуына дейін (үзік қара сызық) және кейінгі (қызыл қатты сызық) массивтің тәжірибелік тасымалдау спектрі. Орташа: жасуша өлшем бірлігінің функциясы ретінде графенге байланысты плазмндық резонанстардың толқын ұзындығының ығысуы. Төменгі жағында: плазмндық резонанстардағы электр өрісінің карталары. с - сингулярлы-фазалы плазмоникалық детекторлар үшін сезімталдықты бағалау. Жоғарғы сол жақта: таза қос нүктелі массив (қара қисық) үшін ұжымдық плазмндық резонанс аймағындағы эллипсометриялық спектрлер және үстіңгі жағында графен тасымалданған (қызыл). Кірістірілген корпусның барлық спектрін көрсетеді. Жоғарғы оң жақта: Гидрлеу және күйдіру кезіндегі шағылысу эволюциясы: қызыл қисық бастапқы спектрлерге сәйкес келеді; жасыл – 20 мин гидрлеу, көк – 60 мин, қара – күйдіруден кейін. Төменгі сол жақта: гидрогенизация функциясы ретінде графендегі D және G шыңдарының амплитудаларының қатынасы. Төменгі оң жақта: толқын ұзындығының функциясы ретінде 1% гидрленген және таза графен жағдайы үшін (70 түсу бұрышы).

д - Гипотетикалық графен негізіндегі белсенді плазмоникалық интерферометр.

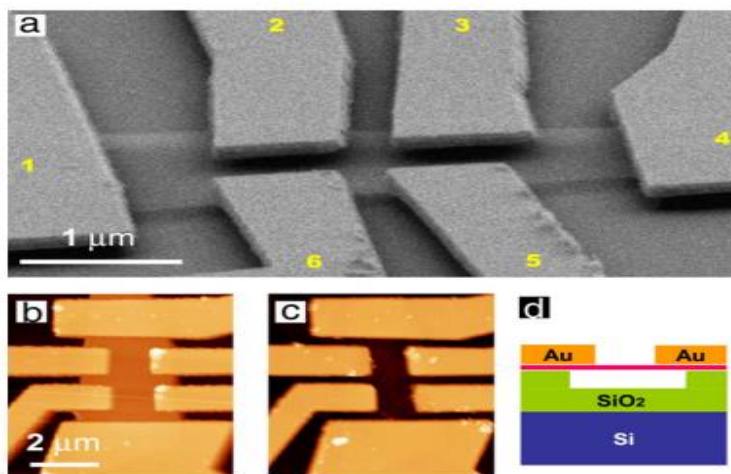
2 АСПАЛЫ ГРАФЕНДЕГІ ӨТЕ ЖОҒАРЫ ЭЛЕКТРОНДАРДЫҢ ҚОЗҒАЛҒЫШТЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

Екі өлшемді (2D) материалдар тобына соңғы қосылған графен басқада ұқсас өзі секілді материалдардан ерекше жолақ құрылымымен ерекшеленеді, ондағы квазибөлшектерді массасы жоқ, хиральды фермиондармен формальды түрде бірдей етеді. Осылайша, графеннің эксперименталды жүзеге асырылуы экзотикалық кванттық Холл күйлеріне әкелетін топологиялық фазадан бастап әйгілі Кляйн парадоксына - релятивистік бөлшектердің аномалиялық туннельденуіне дейінгі құбылыстарды зерттеудің керемет мүмкіндіктерін ұсынады. Дегенмен, үлкен қызығушылық пен келісілген эксперименттік күш-жігерге қарамастан, электрондардың орташа бос жолын микроннан аз етіп шектейтін күшті қоспаның шашырауының болуы прогреске үлкен кедергі болды. Сонымен қатар, графеннің көптеген өткізгіштерді сипаттайтын құрылымдық ақаулары жоқ мінсіз дерлік кристалл екендігі туралы күшті дәлелдер бар. Нәтижесінде заряд тасымалдаушылардың шашырауы сыртқы көздерден туындайтыны анықталды.[8]

Графен құрылғыларының қозғалғыштығын шектейтін шашыраудың нақты табиғаты түсініксіз болып қала берсе де, негізгі субстратпен өзара әрекеттесу негізінен жауапты екендігі туралы дәлелдер бар. Беттік заряд ұстағыштары, фазааралық фонандар, субстраттың тұрақтандырылған толқындары және графен парағындағы немесе астындағы өндіріс қалдықтары ықпал етуі мүмкін. Демек, субстраттың сапасын жақсарту немесе графенді траншеяда тоқтата тұру арқылы субстратты толығымен жою жоғары сапалы үлгілерге қатысты перспективалы стратегия болып көрінеді. Бұрын субстрат үстінде ілулі тұрған құрылғыларға қол жеткізілгенімен, оларда бірнеше электрлік контактілер болмаған, осылайша тасымалдау өлшемдерін болдырмайды.[8]

Бұл жобада біз электрмен байланысқан суспензияланған графеннің өндірісі туралы айтатын боламыз және субстратта жасалған дәстүрлі құрылғыларға арналған әдебиетте айтылған ең жақсы мәндермен салыстырғанда ұтқырлықтың он есе жақсаруына қол жеткіземіз.[8]

Дирак фермиондарының ішкі физикасын зерттеудің жаңа жолдарын ашумен қатар, бұл жақсарту тоқтатылмаған графен үлгілерінің тасымалдау қасиеттерін шектеуде сыртқы шашыраудың басым рөлін көрсетеді(2.1 – суретте көрсетілген).[8]



2.1 Сурет - Үлгі жазықтығына қатысты 15°-де түсірілген әдеттегі аспалы алты зондты графен құрылғысының кескіндері

- (a) Үлгі жазықтығына қатысты 15°-де түсірілген әдеттегі аспалы алты зондты графен құрылғысының SEM кескіні.
- (b) №1 аспалы аспаптың өлшемдер алдындағы AFM кескіні.
- (c) №1 құрылғының AFM кескіні қысқа оттегі плазмасынан алынған графенмен өлшеулерден кейін (бірдей Z шкаласы).
- (d) Құрылғының схемасы, бүйірлік көрінісі. Дегенерацияланған кремний қақпасы (көк), ішінара өрнектелген SiO₂ (жасыл), тоқтатылған бір қабатты графен (қызғылт) және Au/Cr электродтары (қызғылт сары).

Аспалы графен құрылғысын жасау 300 нм SiO₂ жабылған кремний субстратының үстіне бір қабатты механикалық қабыршақтанған графен қабыршағын оптикалық орналастырудан басталады. Бір қабатты графен қабыршақтары олардың контрастына қарай анықталады, кейінірек жартылай бүтін кванттық Холл эффектісін өлшеу арқылы расталады. Біз оттегі плазмасын ою арқылы қабыршақтарды үлгілеуден аулақ боламыз, өйткені ол графеннің шеттеріндегі көлемді және салбыраған байланыстарда қосымша ақаулар тудыруы мүмкін. Оның орнына біз Холл жолақтарына дайындауға жарамды шамамен төртбұрышты пішінді табиғи үлпектерді таңдаймыз. Электрондық сәулелік литография қабыршақпен контактілерді үлгілеу үшін қолданылады. Байланыс материалы (3 нм Cr, одан кейін 100 нм Au) термиялық булану арқылы тұндырылады, содан кейін жылы ацетонға көтеріледі. Электродтардың үлкен өлшемі мен қалыңдығы құрылғының механикалық қаттылығын арттырады. Графен қабыршағын суспензияға бүкіл құрылғыны 90 секунд ішінде 1:6 буферленген оксидті өңдеуге (БОО) батыру арқылы қол жеткізіледі, ол субстрат бойынша шамамен 150 нм SiO₂-ні, соның ішінде қабықтың астындағы аумақты (алтынмен маскирленген SiO₂) біркелкі жояды. Тікелей қабыршақ астындағы субстратты біркелкі ою біздің процесс үшін өте маңызды, өйткені ол біздің құрылғымыз үшін параллель пластина конденсаторының геометриясын сақтай

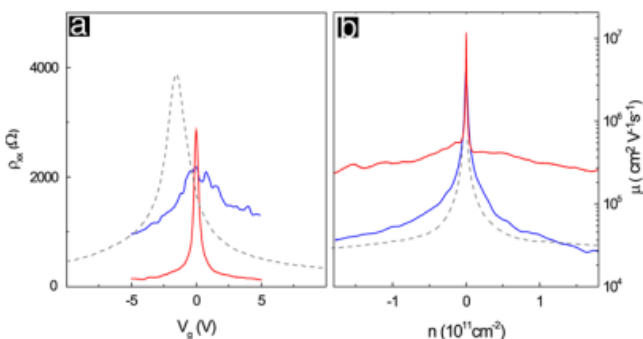
отырып, үлкен аумақты суспензияланған графенді жасауға мүмкіндік береді. Біздің білуімізше, графеннің қатысуымен бұл күтпеген анизотропия бұрын хабарланбаған, алайда, SiO₂ графен интерфейсі бойымен БОӨ жылдам таралуына сәйкес келеді. Ақырында, құрылғы БОӨ-ден этанолға ауыстырылады және ілулі графен парағының беткі кернеуден туындаған құлауын болдырмау үшін критикалық нүктелі кептіру қадамында кептіріледі.[8]

2.1a-суретте үлгі жазықтығына қатысты 15 градус бұрышта түсірілген дайын құрылғының сканерлеуші электрондық микроскоп (СЭМ) кескіні көрсетілген. Графен қалған SiO₂ бетінің үстінде ілінген жұқа парақ түрінде көрінеді. Парақ SiO₂-ге бекітілген алты алтын электродтармен бекітіледі, олар БОӨ өңдеу қадамы кезінде аздап кесіледі (2.1д-суретті қараңыз). Атомдық күш микроскопиясы (АКМ) (2.1б,в-сурет) графен парағының тұтастығын, оның оксид үстіндегі суспензиясын және астындағы субстраттың тегістігін сенімді түрде көрсетеді. 2.1б-сурет SiO₂ бетінен ~150 нм биіктікте тегіс графен бетін анық көрсетеді. Графенді құрайтын көміртегі атомдарының бір қабаты керемет берік және қайталанатын АКМ кескінімен зақымдалмайды. 2.1с-суретте электрлік өлшеу аяқталғаннан кейін және оттегі плазмасы арқылы тоқтатылған графенді алып тастағаннан кейін бірдей құрылғы көрсетілген. Ол графеннің астында бұрын жасырылған SiO₂ субстратын ашады. Астардың биіктігінің өзгеруі құрылғының ортасына сәл иілумен 20 нм-ден аз. Осылайша, біздің өндіру процесінің нәтижесінде SiO₂ субстратынан ~150 нм жоғары ілінген графен құрылғылары пайда болады (2.1д-сурет).[15]

Аспалы графен құрылғыларындағы электрлік өлшемдер 5×10^{-5} мторр қысымнан аз үлгідегі вакуумдық криостатта орындалады. Барлығы бір төрт - зондты және екі алты-зондты құрылғы өлшенді. Криостатты ~5 К негізгі температурасына дейін салқындату алдында құрылғыларды 400 К дейін термиялық күйдіреді, өйткені бұл тоқтатылмаған үлгілердегі жалған легирлеуді азайтатыны көрсетілген. Төрт-зондты өлшеулер қоздыру тогы $I = 100$ нА төмен стандартты төмен жиілікті құлыптау әдістерін қолдана отырып орындалады. Әдеттегі өлшеу 2.1a-суретте таңбаланған 1 және 4 электродтар арасындағы токты жіберуден және тиісінше 2 және 3 электродтар (2 және 6) арасындағы $V_{x,x}$ ($V_{x,y}$) кернеулерін жазудан тұрады. Қарсылық $R_{x,x} = V_{x,x} / I$, ал Холл кедергісі $R_{x,y} = V_{xy} / I$ ретінде есептеледі. Кедергіні кедергіге түрлендіру үшін 2.1-суретте көрсетілгендей кескіндердегі үлгі енінің кернеу зондтары арасындағы қашықтыққа қатынасын бағалаймыз. Кеңейтілген кернеу зондтары үшін жалпы тәсілдемеден кейін біз ток жолының бойымен орталықтан орталыққа дейінгі қашықтықты қолданамыз (L)) үлгі ұзындығы ретінде және ток жолына перпендикуляр кернеу зондтары арасындағы қашықтық үлгі ені (W) ретінде. Содан кейін парақтың меншікті кедергісі $\rho_{x,x} \rho_{x,x} = R_{x,x} (W/L)$ ретінде есептеледі. Үлгілеріміздегі нақты ток пен кернеуді бөлудегі белгісіздік ρ_{xx} есептік мәніне 30%-дан аз қателік әкелуі мүмкін.[15]

Меншікті кедергі графен мен азғындалған легирленген кремний субстраты арасында қолданылатын V_g қақпа кернеуінің функциясы ретінде өлшенеді. Құрылғыларды электростатикалық түрде құлатпауға ерекше назар аударылады, өйткені кез келген белгінің V_g қақпа кернеуін қолдану икемді ілулі графен мен қақпа арасындағы тартымды күшке әкеледі. Ұқсас үлгілерде $V_g = 20$ В шамасында графеннің құлдырауын бақылау бізді эксперименттерімізде қолданылатын қақпа кернеулерінің диапазонын ± 5 В-қа дейін шектеуге әкеледі. Біз $V_g = \pm 5$ В кезінде №1 типтік құрылғыға әсер ететін күшті бағалаймыз.[8]

$F = 0.2LW V_g^2 / (d_0 + d_1)^2 \sim 3 \times 10^{-8}$ N, мұндағы $d_0, d_1 = 150$ нм – қалған және қашалған SiO_2 және L қалыңдығы, $W \sim 3$ мкм – ұзындығы мен ені құрылғының. Қарапайым механиканы пайдалана отырып, біз графендегі максималды деформацияны ε $V_g \pm 5$ В диапазонында $\varepsilon \sim 0.5(FEtW)^{2/3} \sim 5 \times 10^{-4}$ деп есептейміз, $E = 1$ ТПа Янг модулі және қалыңдығы t деп есептейміз. $t = 0.34$ нм. Біз бұл штамм деңгейі графендегі электронды тасымалдауға айтарлықтай әсер етпейтінін анықтаймыз(2.2 – суретте көрсетілген).[8]



2.2 Сурет – Графеннің электронды штамм арқылы тасымалдау графигі

(a) №1 құрылғы үшін (көк) және (қызыл) токпен күйдіруден кейінгі V_g қақпа кернеуінің функциясы ретінде өлшенген төрт зондты кедергі ρ_{xx} ; салыстыру үшін көрсетілген субстратта (сұр нүктелі сызық) дәстүрлі жоғары мобильді құрылғыдан алынған деректер. Механикалық күйреуді болдырмау үшін қақпа кернеуі ± 5 В диапазонымен шектеледі.

(b) Ұтқырлық $\mu = 1/e\rho_{xx}$ бірдей құрылғылар үшін тасымалдаушы тығыздығының n функциясы ретінде.

2.2a-суреттің көк сызығы V_g қақпа кернеуінің функциясы ретінде өлшенген №1 үлгінің ρ_{xx} төмен температуралық кедергісін көрсетеді. Біз кедергідегі максимуммен көрсетілген Дирак шыңын нөлге жақын V_D қақпа кернеуінде байқаймыз. $\rho_{xx}(V_g)$ шағын қайталанатын ауытқулар әдетте мезоскопиялық құрылғыларда көрінетін әмбебап өткізгіштік ауытқуына сәйкес келеді. Тасымалдаушы тығыздығы n Холл әсерінің өлшемдері арқылы $n(V_g) = B/e\rho_{xy}(V_g, B)$ ретінде анықталады, мұнда B – қолданылатын магнит өрісі. Құрылғының қақпасының сыйымдылығы $C_g = n(V_g)e/(V_g - V_D) \sim 60$ aF μm^{-2} ретінде

есептеледі. Өлшенген сыйымдылық 150 ілінген графен үшін күтілетін $C_g \sim 47 \pm 5$ $\text{aF}\mu\text{m}^{-2}$ мәніне жақын. ± 20 нм жоғары 150 ± 20 нм қалдық SiO_2 , сериялық конденсатор үлгісін пайдаланып есептелгендей. Бұл өлшеулер кезінде құрылғының тоқтатылғанын тәуелсіз тексеруді қамтамасыз етеді. Соңында, жоғарыдағы тасымалдаушы тығыздығын пайдаланып, $n = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ кезінде электронның қозғалғыштығын $\mu = 1/\rho_{\text{ерхх}} \sim 28\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1}\text{s}^{-1}$ анықтаймыз. Бұл бірдей тығыздықтағы тоқтатылмаған құрылғылар үшін ең жақсы хабарланған мәндермен салыстыруға болады. Осылайша, субстратты алып тастауға қарамастан, бұл кезеңде графендегі шашырау айтарлықтай азаймайды, бұл бізді графен бетінде сіңірілген қалдық қоспалардан туындаған деген қорытындыға әкеледі.[16]

Ұтқырлықты одан әрі жақсарту үшін қалған қоспаларды жою қажет. Бұл құрылғы арқылы үлкен ток жіберу жүзеге асырылады. Тоқтатылмаған үлгілер үшін бұл ағымдағы жасыту графен парағын жергілікті түрде есептелген $T \sim 600 \text{ C}$ -қа дейін қыздыру және құрылғы бетінде қалған қалдықтардың көпшілігін дайындау қадамдарынан десорбциялау үшін көрсетілді. Ағымдағы жасыту тоқтатылмаған құрылғыларда электрлік тасымалдаудың сапасын жақсартқанымен, өңдеу қозғалғыштығын айтарлықтай жақсартуға әкелмейді. Сірә, бұл жақсартудың болмауына графен мен субстрат арасындағы интерфейсте тұрақты түрде ұсталған қоспалар жауапты. Екінші жағынан, ілулі құрылғылар мұндай шектеулерге жатпайды, өйткені графен парағының екі жағындағы қоспалар десорбциялануы мүмкін. Токты күйдіру құрылғыдағы токты алдын ала анықталған мәнге дейін күшейту, бірнеше минут күту, токты нөлге дейін азайту және үлгінің электрлік тасымалдау қасиеттерін қайта өлшеу арқылы жүзеге асырылады. Процедура құрылғының қақпа реакциясында өзгерістер пайда болғанша қайталанады, олар тек графен қалыңдығы $0,34 \text{ нм}$ деп есептелетін $\sim 2 \times 10^8 \text{ A}/\text{см}^2$ өте үлкен ток тығыздықтарында орын ала бастайды.[8]

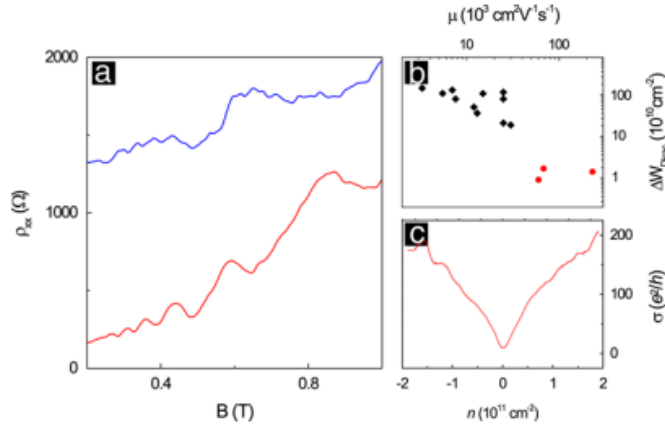
Өлшенген әрбір құрылғы үшін ағымдағы жасыту бастапқы күймен салыстырғанда тасымалдау қасиеттерінде айтарлықтай айырмашылыққа әкеледі, біз оны мысал ретінде №1 құрылғыны пайдаланып суреттейміз. Ағымдағы жасыту кезінде №1 үлгінің кедергісі Дирак нүктесінен алыс кернеулер үшін 8 еседен астам төмендейді. Бұл ретте Дирак шыңының ені шамамен 20 есе азаяды, ал құрылғының максималды кедергісі әрең өзгереді (2.2a-суретте көрсетілген). Бұл үлкен өзгерістер айтарлықтай жақсартылған үлгі сапасын көрсетеді. Біз бұл жақсартуды үш түрлі өлшем арқылы анықтаймыз: тасымалдаушының қозғалғыштығы, Дирак шыңының ені және Шубников де Хаас тербелістерінің басталу өрісі.[16]

Үлгі сапасының бірінші өлшемі – μ қаныққан электрондардың жоғары тығыздығында бағаланатын μ тасымалдаушының қозғалғыштығы. Тоқтатылмаған құрылғыларда ұтқырлық 2000 мен $25\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ с}^{-1}$ аралығында болады, $\mu \sim 25\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ с}^{-1}$ $n = 5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ әдебиетте келтірілген ең жоғары мән.

Құрылғыларымыздағы қақпа кернеуінің шектеуіне байланысты ұтқырлықты $n = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ кішірек тығыздықта өлшейміз, мұнда ең жоғары хабарланған μ шамамен $30\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (2.2б-сурет, нүктелі сызық). Бұл мән ағымдағы жасытуға дейінгі №1 тоқтатылған үлгідегі $28\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (2б-сурет, көк сызық) қозғалғыштығымен салыстыруға болады. Ағымдағы жасыту кезінде №1 үлгідегі қарсылықтың төмендеуі $n = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ең жоғары тығыздығымызда өлшенген $230\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (2.2б-сурет, қызыл сызық) ұтқырлықтың артуына әкеледі. Әрбір ілулі құрылғы күйдіруден кейін $60\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ жоғары қозғалғыштығын көрсетеді. $230\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ең жоғары ұтқырлығымыз әдебиетте осы уақытқа дейін хабарланған мәндерден шамамен 10 есе жақсарғанын білдіреді және бұл жұмыстың негізгі нәтижесі болып табылады.[8]

Ұтқырлықты арттырудан басқа, біз тоқтатылған және күйдірілген үлгілердің Дирак шыңы жасыту алдындағы тоқтатылған құрылғылармен және дәстүрлі субстрат қолдайтын құрылғылармен салыстырғанда өте тар екенін байқаймыз. Біз Дирак шыңының ені үлгідегі зарядтың біркелкі еместігіне байланысты екенін дәлелдейміз. Жақында көрсетілгендей, шағын заряд тығыздықтарында графен саңылаулар мен электрондардың мезоскопиялық көлшіктеріне ыдырайды. Шалшықтардың пайда болу механизмі талқыланады, бірақ луждардың болуы көлік сипаттамаларын өзгертеді, нәтижесінде Дирак шыңы кеңейеді. Біз сынама сапасының өзгерістерін сандық мәнді $\Delta W \text{ Dirac}$ өлшеу арқылы анықтаймыз, ол кезде меншікті кедергі оның максималды мәнінен екі есеге төмендейтін тасымалдаушы тығыздығы ретінде анықталады. Мұндай $\Delta W \text{ Dirac}$ шұңқырдың пайда болуына байланысты зарядтың біртексіздігінің жоғарғы шегін қамтамасыз етеді. Мысалы, №1 құрылғыда Дирак шыңы шамамен $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (2.2б-сурет, қызыл сызық) дейін тарылады, бұл жасыту алдындағы бірдей үлгімен салыстырғанда 10 еседен астам жақсарту (2.2б-сурет, көк сызық). және әдеттегі жоғары қозғалғыштығы жоқ аспалы құрылғылармен салыстырғанда (2.2б-сурет, қара нүктелі сызық).[16]

Төмендетілген зарядтың біртексіздігі тасымалдаушының қозғалғыштығының жоғарылауымен байланысты екенін ескертеміз (2.3б-сурет). Қозғалғыштығы 2000-нан $30\,000 \text{ см}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ аралығында болатын әдеттегі заряд біркелкі еместігі $2^{-9} \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ болатын суспензияланбаған үлгілермен (қара квадраттар) салыстырғанда, ілулі және күйдірілген үлгілер (қызыл шеңберлер) біркелкі аспалы құрылғыларда байқалатын трендке сәйкес магнитуданың жоғары қозғалғыштығы және зарядтың біртекті еместігінің шама тәртібі (2.3 – суретте көрсетілген).[17]



2.3 Сурет - Төмендетілген зарядтың біртектілігі тасымалдаушының қозғалғыштығының жоғарылауымен байланысты екенін көрсететін график

- (a) $n = 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ және $T \sim 5 \text{ K}$ кезінде жасыту алдында (көк) және жасытудан кейінгі (қызыл) №1 тоқтатылған үлгі үшін магнит өрісінің функциясы ретінде Холл кедергісінің ρ_{xx} компоненті
- (b) Барлық үш өлшенген аспалы құрылғылар (қызыл шеңберлер) және субстратта бұрын зерттелген құрылғылар (қара квадраттар) үшін құрылғының қозғалғыштығы μ функциясы ретінде сызылған ΔW_{Dirac} шыңының жарты максимумындағы толық ені.
- (c) Өткізгіштік σ ағымдағы жасытудан кейінгі №1 үлгі үшін тасымалдаушы тығыздығының n функциясы ретінде.

Осылайша біз үлгі сапасының өлшемі ретінде Шубников деХаас тербелістерінің басталуына жүгінеміз. Қарапайым модельде бұл тербелістер заряд тасымалдаушы бір циклотрон орбитасын шашыраусыз аяқтауы үшін жеткілікті күшті V_{SdH} магнит өрісінде басталады, бұл $\omega_c \tau \sim 1$ -ге тең, мұндағы ω_c – циклотрон жиілігі және τ – шашырау уақыты. Графендегі жартылай классикалық қатынас $\omega_c = ev_F V_{\text{SdH}} / \hbar (\pi n)^{1/2}$ береді, мұнда $v_F = 106 \text{ м/с}$ – Ферми жылдамдығы. Бұл $\tau \sim \hbar (\pi n)^{1/2} / ev_F V_{\text{SdH}}$ бағалауына әкеледі. 2.3а-суретте №1 үлгідегі ең жоғары қозғалғыштығымыздағы SdH эффектісі көрсетілген. Тербеліс $V_{\text{SdH}} \sim 250 \text{ мТ}$ (2.3а-сурет, қызыл сызық) дейін байқалады, ал ағымдағы жасыту алдында SdH тербелісі байқалмайды (2.3а-сурет, көк сызық). Басқа тоқтатылған құрылғылар 250-ден 600 мТ-ға дейінгі V_{SdH} көрсетеді және біз $n = 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ кезінде ең жақсы құрылғы үшін $\tau \sim 2 \times 10^{-13} \text{ с}$ деп есептейміз. Екінші жағынан, ілінбеген құрылғыларда SdH бірдей тығыздықтағы тербеліс $\tau \sim 7 \times 10^{-14} \text{ с}$ сәйкес келетін $\sim 700 \text{ мТ}$ -ден үлкен өрістерде көрінеді. Сондықтан, ілулі құрылғыларда Шубников деХас тербелісінің ерте басталуы электрондардың шашырау уақытының қысқаруына сәйкес келеді және осылайша таза үлгілерді көрсетеді. SdH тербелістерінің басталуы үлгі сапасының сапалық көрсеткіші болғанымен, біз τ_q кванттық шашырау уақытын тікелей шығара алмаймыз, өйткені тығыздықтың біртектілігі сияқты басқа факторлар да басталуға әсер етеді.[17]

Ин-ситу күйдірілген, суспензияланған графен үлгілеріндегі тасымалдау өлшемдердің нәтижелерін қорытындылай келе, біз ұтқырлықтың жоғарылауымен,

үлгінің біртектілігінің төмендеуімен және шашырау уақытының жоғарылауымен өлшенетін үлгі сапасының айтарлықтай жақсарғанын байқаймыз. Атап айтқанда, біз тасымалдаушының қозғалғыштығы мен үлгінің біртектілігінің шамасының жақсару ретін байқаймыз, ал SdH тербелістерінің басталу өрісінің жақсаруы шамамен 3 факторға тең. Жалпы алғанда, біздің дайындау процедурасы нәтижесінде құрамында өте таза үлгілер бар деген қорытындыға келдік. бұрын зерттелген субстрат қолдайтын құрылғылармен салыстырғанда шашыратқыштар азырақ. Бір қызығы, ағымдағы жасытуға дейін тоқтатылған үлгілер, сондай-ақ ағымдағы күйдірілген, бірақ тоқтатылмаған үлгілер жоғарыда аталған сапаны жақсартуды көрсетпейді. Бұл SiO₂ мен графен арасында ұсталған қоспалар тоқтатылмаған графен құрылғыларының қазіргі буынының қозғалғыштығын шектейтінін көрсетеді.[8]

Соңында, біз құрылғыларымыздағы қалдық шашыратқыштардың табиғатын қарастырамыз. Ағымдағы жасыту кезінде біздің үлгілердегі тасымалдаушы орташа бос жол l құрылғының әдеттегі өлшемдеріне жақындайды. Шынында да, ұтқырлық пен орташа бос жол $\sigma = en\mu = 2e^2/h(k_F l)$ арасындағы жартылай классикалық қатынасты пайдалана отырып, мұнда $k_F = (\pi n)^{1/2}$, біз $n =$ кезінде №1 үлгі үшін $l \sim 1,2$ мкм бағалаймыз. $2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Сондықтан құрылғының жиектері де, электродтар да шашырауға айтарлықтай ықпал етуі мүмкін. Бұл тасымалдаушы тығыздығының n функциясы ретінде $\sigma(n) = 1/\rho_{xx}(n)$ өткізгіштігінің байқалған күшті субсызықтық тәуелділігіне сәйкес келеді (2.3с-сурет). Мұндай мінез-құлық әдетте нүкте ақауларымен немесе үлгі жиектерімен байланысты қысқа қашықтықтағы шашыраудан туындайды деп дәлелденді. Тұтастай алғанда, біз шашыраудың сыртқы көздері әлі де қазіргі геометрияда шектеуші фактор болуы мүмкін және үлкен аумақтық құрылғылар одан да жоғары қозғалғыштықты көрсете алады деп болжаймыз.[17]

2.1 Поляризацияға сезімтал абсорбция әсеріне негізделген мөлдір субстраттағы графеннің қабаттарын дәл анықтау

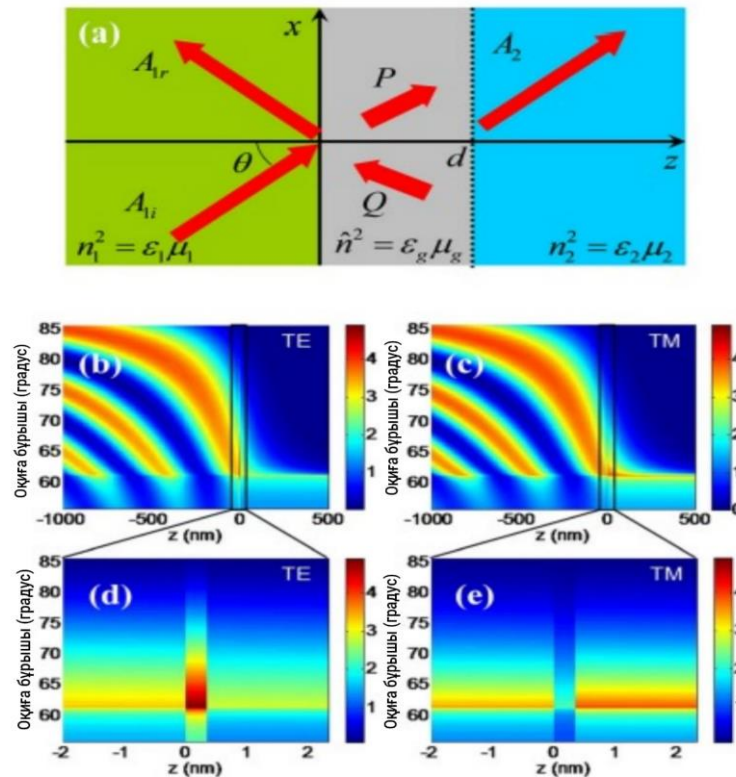
Бұл тақырыпта біз сэндвичтелген графен құрылымының толық ішкі шағылысу кезінде көлденең электрлік (КЭ) толқыны үшін күшті оптикалық жұтуды көрсететінін ұсынамыз. Сондай-ақ графеннің кең жолақты сіңірілуінің жоғарылауы байқалды. Осы зерттеуде қолданылған модель жоғары көрсеткішті (орташа 1, сыну көрсеткіші n_1) және төмен көрсеткішті (орташа 2, сыну көрсеткіші n_2) арасында қыстырылған графен қабатынан тұрады (2.4(a)-сурет). Аралық графен қабатының күрделі оптикалық тұрақтысы $n^{1/4} n + ik$, мұндағы n – графеннің сыну көрсеткіші және j – өшу коэффициенті. d қалыңдығы – графен

қабаттарының санына қатысты (мысалы, $d \approx 0,34$ нм)(2.4 – суретте көрсетілген).[18]

Әрбір ортада электромагниттік өріс компоненттері оң және теріс жүретін компоненттердің суперпозициялары ретінде жазылады. Электрлік (E) және магниттік (H) өрістерді тангенциалды өріс үздіксіздігінің шектеуі кезінде векторлық толқын теңдеуін шешу арқылы алуға болады. Жарықтың түсу жазықтығы x, z-жазықтығы деп қабылданады. Ал салыстырмалы өткізгіштік пен салыстырмалы өткізгіштік қабілеті сәйкесінше ϵ_i және μ_i арқылы белгіленеді, мұндағы $i = 1, 2$ ортаны немесе графенді білдіреді. Барлық материалдар магниттік емес деп есептеледі ($\mu_i = 1$). Электр өрісі түсу жазықтығына перпендикуляр болатын толқыны үшін өріс құраушыларын келесідей жазуға болады:[18]

$$\begin{cases} H_x = \frac{-k_{1z}}{\omega\mu_0\mu_1} (A_{1i}e^{ik_{1z}z} - A_{1r}e^{-ik_{1z}z})e^{ik_x x} \\ E_y = (A_{1i}e^{ik_{1z}z} + A_{1r}e^{-ik_{1z}z})e^{ik_x x} \\ H_z = \frac{k_x}{\omega\mu_0\mu_1} (A_{1i}e^{ik_{1z}z} + A_{1r}e^{-ik_{1z}z})e^{ik_x x} \end{cases} \quad \text{for } z < 0, \quad (2.1)$$

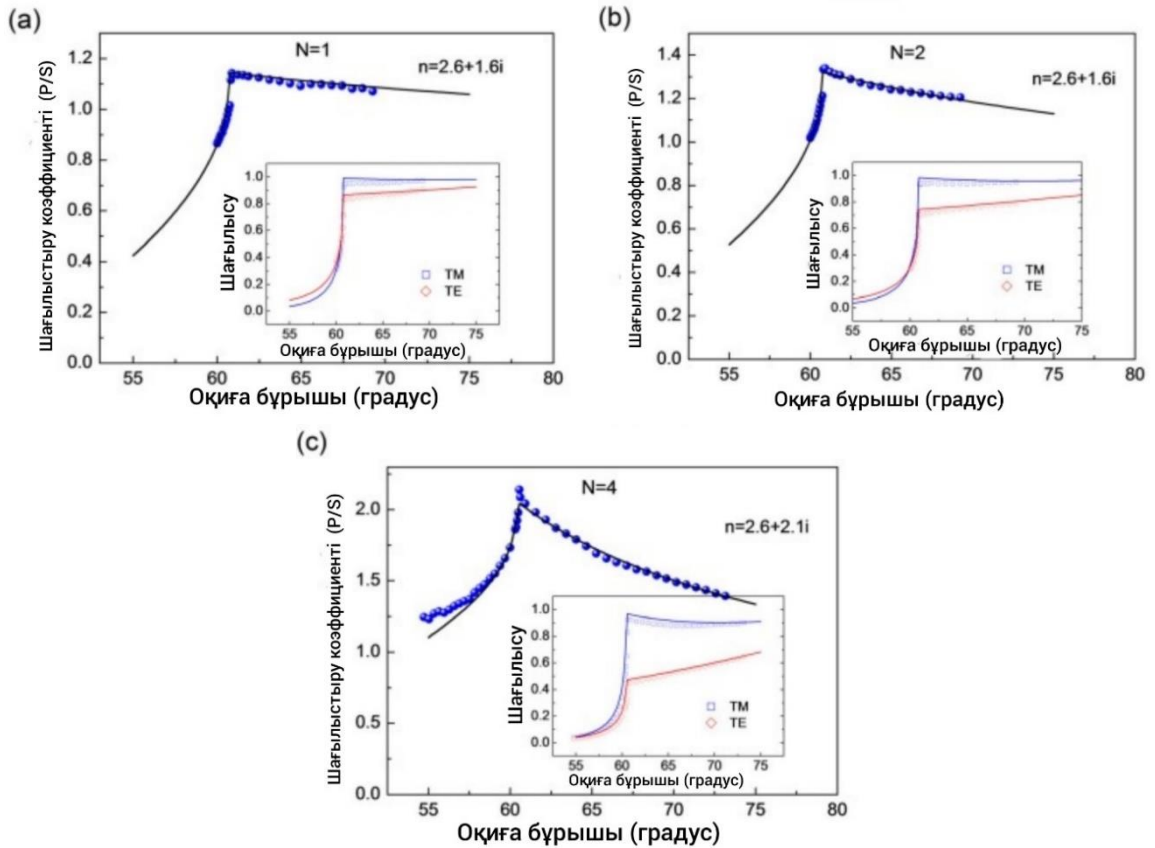
$$\begin{cases} H_x = \frac{-k_{gz}}{\omega\mu_0\mu_g} (Pe^{ik_{gz}z} - Qe^{-ik_{gz}(z-d)})e^{ik_x x} \\ E_y = (Pe^{ik_{gz}z} + Qe^{-ik_{gz}(z-d)})e^{ik_x x} \\ H_z = \frac{k_x}{\omega\mu_0\mu_g} (Pe^{ik_{gz}z} + Qe^{-ik_{gz}(z-d)})e^{ik_x x} \end{cases} \quad \text{for } 0 < z < d \quad (2.2)$$



2.4 Сурет - Шағылысу нәтижелері

- (a) Екі диэлектриктердің арасында орналасқан графен қабатының схемасы;
 (b) ТЕ толқыны үшін энергияның z осіне қарсы таралуы және h түсу бұрышы;
 (c) z осіне қарсы ТМ толқыны үшін энергияның таралуы және h түсу бұрышы; (d) ұлғайту (b);
 (e) (c) тармағының ұлғаюы. Параметрлер $n_1 \approx 1:61$, $n_2 \approx 1:41$, $n \approx 2:6$, $j \approx 1:3$ және $d \approx 0:34$ нм. $k \approx 632:8$ нм. ((b)-(e)) ішіндегі түс жолақтары тең нормаланған.

Шағылысу нәтижелерімен салыстырғанда (2.5-сурет, кірістірмелер) ТМ мен ТЕ толқынының шағылысу коэффициенті теориялық және эксперименттік нәтижелер арасындағы жақсы сәйкестікті көрсетеді. Себебі шашырау сияқты кейбір әсерлер екі режимді бөлу арқылы басылуы мүмкін. ТЕ толқынының түсуіндегі шағылысу коэффициенті де, шағылысу профилі де графеннің әртүрлі қабаттары үшін үлкен айырмашылықты көрсетеді, сондықтан бұл әдіс графен қабаттарының қалыңдығын тиімді анықтай алады. Шағылысу және контраст спектроскопиясы негізінде графен қабаттарының санын анықтау үшін бірнеше басқа әдістер қолданылып келеді. Дегенмен, бұл әдістер әдетте көрінетін диапазонда мөлдір емес 300 нм SiO₂ бар Si субстратын пайдаланады. DTRM мөлдір субстраттағы графен қабаттарының санын дәл және жылдам анықтай алады(2.5 – суретте көрсетілген).[10]



2.5 Сурет - ТМ толқынының ТЕ толқынына оптикалық шағылысу қатынасының эксперименталды және есептелген бұрыштық тәуелділігі

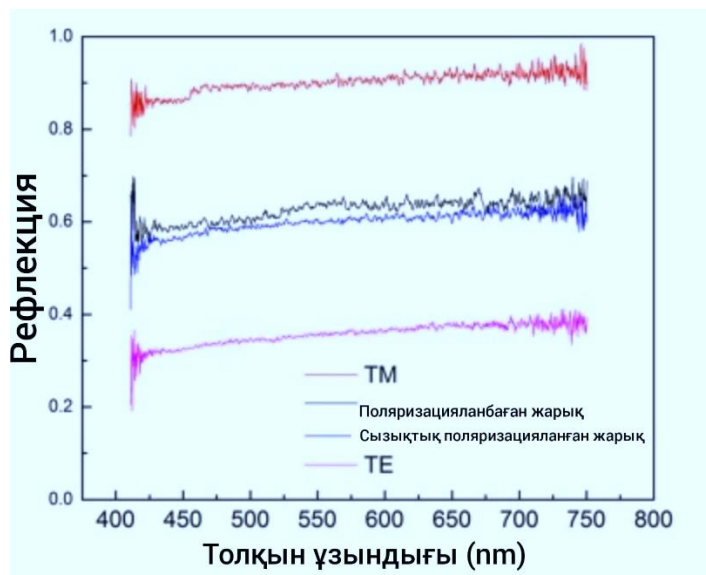
- (a) $n = 2.6$ және $j = 1.6$ болатын моноқабатты графен ($N = 1$);
- (b) $n = 2.6$ және $j = 1.6$ болатын екі қабатты графен ($N = 2$);
- (c) $n = 2.6$ және $j = 2.1$ болатын төрт қабатты графен ($N = 4$). Кірістірілгендер ТМ және ТЕ толқындары үшін оптикалық шағылыстырудың эксперименталды және есептелген бұрыштық тәуелділігі болып табылады.

Графеннің оптикалық тұрақтысы n бұрын спектроскопиялық эллипсометрия және оптикалық спектрлер арқылы өлшенген. Кейбір зерттеулерде механикалық қабыршақтанған графеннің $n=2.6$ және $k=1.3$ типтік мәні қарастырылды. эксперименталды нәтижелер моноқабатты және екіқабатты графендер үшін ең жақсы фитингтер $n = 2.6$, $k = 1.6$, ал төрт қабатты графен үшін $n=2.6$, $k=2.1$ алынғанын көрсетті. Бұл сәйкессіздіктің бір ықтимал себебі - CVD әдісімен өсірілген осы талдауда пайдаланылған графен үлгілері механикалық қабыршақтану арқылы алынған үлгілерге қарағанда біркелкі таралуды көрсетеді. Сонымен қатар, ТЕ толқыны үшін максималды сіңіру а моноқабатты, екі қабатты және төрт қабатты графендер үшін әмбебап абсорбенттен айтарлықтай үлкен.[10]

Төрт қабатты графеннің спектрлік өлшеуі 2.6-суретте көрсетілгендей кең жолақты поляризацияға тәуелді жұтылуды көрсетті. ТЕ толқыны үшін күшті жұтуды 420нм-ден 750нм-ге дейінгі диапазонда байқауға болады, бұл

поляризацияны көрсетеді. графеннің тәуелді абсорбциясы графен қабаттарының санын анықтау сияқты қолданбалар үшін кең спектрлік диапазонда қолданылуы мүмкін.[10]

Кәдімгі екі өлшемді электронды газда стандартты эксперименттік жағдайларда тек ТМ режимі болуы мүмкін. Бұл GaAs/AlGaAs кванттық ұңғыма құрылымдары сияқты әдеттегі екі өлшемді электронды газ жүйесінде өткізгіштіктің болжалды бөлігі әрқашан оң болатындығына байланысты(2.6 – суретте көрсетілген).[10]



2.6 Сурет - ТМ және ТЕ толқындары

ТМ және ТЕ толқындары, поляризацияланбаған жарық және 45 сызықтық поляризацияланған жарық үшін төрт қабатты графеннің спектрлік шағылысуы.

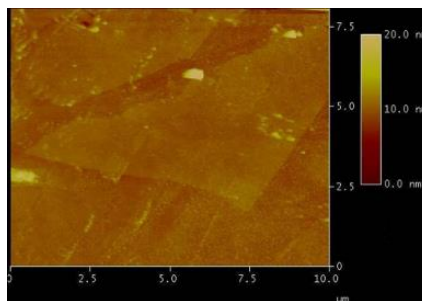
2.2 Субстраттардың графеннің Раман спектріне әсері: сапфирдегі графен және шыныдағы графен

Қазіргі таңда графен физика мен құрылымын зерттеу қауымдастығының үлкен назарын аударды. Өзінің ерекше физикалық қасиеттерінен басқа, ол электронды қосымшалар үшін материал ретінде қарастырыла береді. Гейм мен Новоселов EG 0,3 эВ жолақ саңылауын екі қабатты графен ЕҚГ-де индукциялауға және бір қабатты графен БҚГ-де кеңістіктік шектеу немесе бүйірлік супертор түріндегі потенциал арқылы құрастыруға болатынын ұсынды. Бөлме температурасында $15\ 000\ \text{cm}^2\ \text{V}^{-1}\ \text{S}^{-1}$ вагонның өте жоғары қозғалғыштығы Si-ге қарағанда артықшылықты білдіреді, бұл графенді кәдімгі қосымша металл-оксид-

жартылай өткізгіш технологиясынан тыс тізбектерде қолдану үшін үміткер етеді.[20]

Графеннің бірегей қасиеттерін және оның электрондық материал ретінде қолданылуын болашақта зерттеу әртүрлі материалдар мен субстраттармен графен интеграциясын талап етеді. Дегенмен, қазіргі уақытта Si/SiO₂-ден басқа субстраттардағы графеннің көрінуі немесе қасиеті туралы өте аз нәрсе белгілі және осы субстраттарда аз қабатты графиттердегі қабаттардың санын анықтау үшін расталған тәжірибелік құрал жоқ. Осылайша, әртүрлі субстраттарға графен және графен негізіндегі құрылғылар үшін нанометрология құралы ретінде Раман спектроскопиясын кеңейту маңызды. Раман спектрінің графеніне субстраттың әсерін зерттеудің тағы бір мотивациясы графен-субстрат интерфейсінің рөлі туралы негізгі мәселе болып табылады. Бұл мағынада әртүрлі субстраттардағы графеннен алынған Раман спектрлерінің өлшемдері әртүрлі фонон режимдері үшін графен-субстрат байланысының беріктігіне жарық түсіруі мүмкін.[20]

Бұл тақырыпта біз әртүрлі субстраттарда орналасқан бір қабатты және бірнеше қабатты графен ФЛГ бөлме температурасының спектроскопиялық Раман микроскопиясы туралы хабарлаймыз. Графен қабаттарын анықтамалық Si/SiO₂ 300 нм субстратқа және n-типті 100 GaAs пластинаны қамтитын ерекше әр түрлі субстраттар жинағына орналастыру үшін бірдей процедура қолданылды. А-ұшағы сапфир Al₂O₃, және шыны субстраттары. Қабаттар саны графенді Si/SiO₂ 300 нм визуалды тексеруден, АФМ атомдық-күштік микроскопиясынан және екі өлшемді диапазонының ерекшеліктерін Анықтамада баяндалған тәсілмен талдаудан анықталды. GaAs субстраты үшін біз тек АФМ және екі өлшемді диапазонының Раман спектрімен бекітілген бес қабатты графенді тасымалдай алдық. Сапфир мен шыны субстраттардағы графенді АФМ тексеруі қалыңдығы 2 нм болатын дақтарды анықтады, бұл төрт қабаттан азырақ болуын көрсетеді. 2.7-суретте шыны субстратта графеннің АФМ кескіні көрсетілген. Келесі Раман талдауы сапфир мен шыныға тасымалданатын графен үлгілері БҚГ болуы мүмкін деген қорытынды жасауға мүмкіндік берді(2.7 – суретте көрсетілген).[21]



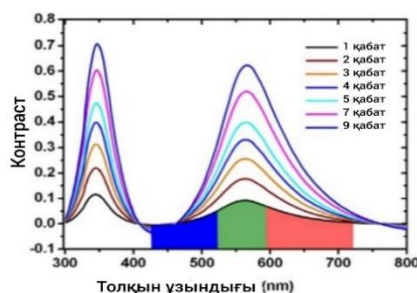
2.7 Сурет - Шыны субстраттағы графен қабатының микрокүшті микроскопиялық кескіні

2.3 Оптикалық бейнелеу арқылы екі өлшемді материалдардың қалыңдығын анықтау

Екі өлшемді материалдар графен және оның туындылары, графен оксиді (ГО), гидрленген графен, азот/бор қоспасы бар графен, бір және аз қабатты бор нитридi (БН) және молибден дисульфидi (MoS₂) Қазіргі таңда олардың танымал болуына байланысты үлкен қызығушылық тудырды. Электрлік, механикалық, жылулық және оптикалық қасиеттерге ие. Екі өлшемді материалдардың қасиеттерін зерттеу үшін маңызды қадамдардың бірі олардың электронды, оптикалық және басқа қасиеттеріне қатты әсер ететін қалыңдығын анықтау болып табылады.[22]

ME графен және жұқа MoS₂ қабаттары механикалық қабыршақтану әдісімен жасалған және SiO₂/Si субстратына тасымалданған. ГО Хаммерс әдісі бойынша синтезделді. Азот қосылған графен үлгілері CVD әдісімен дайындалды және газ көзі ретінде сутегі мен метанды пайдаланып мыс фольгада өсірілді. Азот қоспасына қол жеткізу үшін реакция процесі кезінде аммиак газы енгізілді. Үлгілердің қалыңдығын растау үшін Раман спектроскопиясы және АФМ пайдаланылды. Үлгілердің оптикалық кескіндерін алу үшін Олимпус ВХ51 микроскопы және оптикалық кескіндердің әрбір пикселіндегі R, G, көк (B) мәндерін оқу үшін Matlab бағдарламалық құралы пайдаланылды.[22]

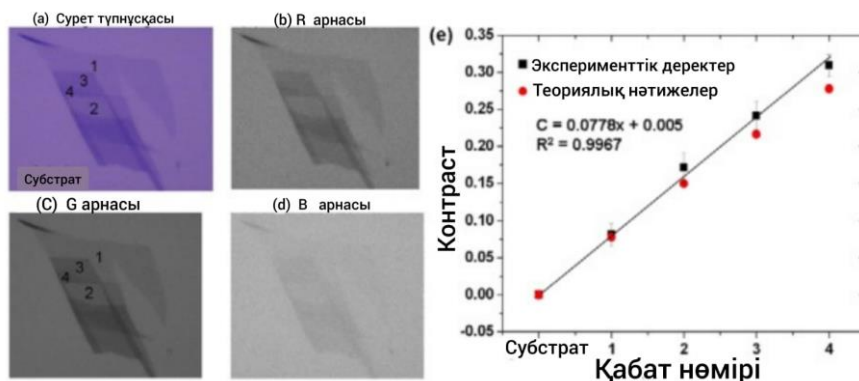
2.8-суретте Френель теңдеуіне негізделген қалыпты түскен жарық кезінде SiO₂(285 нм)/Si субстратындағы әртүрлі қалыңдықтағы (бір, екі, үш, төрт, бес, жеті және тоғыз қабат) графен үлгілерінің контраст спектрлерінің теориялық есептелген нәтижелері келтірілген. R, G және B сүзгілеріне арналған беру ауқымдары да белгіленген. Бұл суреттен көрініп тұрғандай, қабаттар саны артқан сайын контраст мәні өсті, бұл графеннің қалыңдығын бір мәнді анықтауға мүмкіндік береді (бұл біздің алдыңғы жұмысымызда егжей-тегжейлі талқыланады). Содан кейін біз сәйкесінше R, G және B тарату аймақтарындағы контраст мәндерінің интеграциясын есептедік(2.8 – суретте көрсетілген).[23]



2.8 Сурет - Әртүрлі графен үлгілерінің контраст спектрлері қалыңдығы (бір, екі, үш, төрт, бес, жеті және тоғыз қабат)

RGB тарату аймақтары үшін бір қабатты графеннің орташа контраст мәндері жеке түрде 0,031 (R), 0,077 (G) және 0,0114 (B) болып табылады, олар сәйкес тасымалдау ауқымына бөлінген біріктірілген мәнді пайдалану арқылы алынады. Бұл құжатта қолданылатын R, G және B тарату диапазоны 590 нм–720 нм (R), 520 нм–590 нм (G) және 435 нм–520 (B) болып табылады, ол CCD ішіндегі Bayer RGB сүзгісінен кейін. Графеннің бір-төрт қабаты үшін теориялық контраст мәндері сәйкесінше 0,077 (G), 0,149 (G), 0,216 (G) және 0,278 (G) болып табылады.[22]

2.9 (a) суретте қабат нөмірі Раман ақ жарық спектроскопиясы арқылы алдын ала анықталған SiO₂(285 нм)/Si субстратында тасымалданған графеннің бір-төрт қабатының оптикалық бейнесі берілген. 2.9 (b)–(d) суреттері оңай қарау үшін сұр реңкті пайдаланып түпнұсқа оптикалық кескіннің R, G және B арнасының кескіндерін көрсетеді. 2.9 (b) суретіндегі R арнасының кескінінен графен үлгілерінің контраст мәндерінің қалыңдығына қарай өзгеретінін көруге болады, бірақ кескін бұлыңғыр. Дегенмен, әрбір пикселде B мәнін көрсететін 2.9 (d) суреті үшін бүкіл кескін ұқсас сұр деңгейді береді және графен үлгілері мен субстратты ажырату қиын. Графен үлгілерінің контраст мәндері 2.9 (c) суретте көрсетілгендей G арнасын көрсету кезінде әлдеқайда жоғары екені анықталды. Бұл нәтижелер RGB диапазонындағы орташа контрасттың теориялық есебімен де жақсы сәйкес келеді. G диапазонындағы орташа контраст (0,077) R диапазонындағыдан (0,031) жоғары, ал B диапазонындағы орташа контраст ең төмен (0,011)(2.9 – суретте көрсетілген).[24]



2.9 Сурет - Графен үлгілерінің контраст мәндері

(a) SiO₂(285 нм)/Si субстратында тасымалданған графен үлгілерінің оптикалық кескіні.

(b)–(d) Қарап шығуды жеңілдету үшін 256 сұр деңгейін (0 ең күңгірт және 255 ең ашық дегенді білдіреді) пайдаланатын түпнұсқа кескіннің R, G және B арналары. Бұл R (G, B) арнасының кескінін Matlab бағдарламалық құралындағы «imread» функциясын пайдалану арқылы алуға болады. Оптикалық кескіннің әрбір пикселіндегі R, G және B мәндерін оқуға болады.

(e) Теориялық және эксперименталды түрде табылған графеннің бір-төрт қабаты үшін G контраст мәндері.

Графеннің бір-төрт қабаты үшін G мәндерінен теориялық және тәжірибелік түрде алынған контраст мәндері 2.9 (е) суретте көрсетілген. Сандық кескінді (2.9 (а) сурет) компьютерге жүктеп салу арқылы графен үлгісі мен субстраттан кездейсоқ 20 нүкте алынады және G мәндерінің орташа және стандартты ауытқуы алынады. Содан кейін C контраст мәні мына теңдеу арқылы есептеледі:

$$C = \frac{G_{sub} - G_{sam}}{G_{sub}}. \quad (2.3)$$

Мұнда, G_{sub} - субстраттан алынған G мәні және G_{sam} графен үлгісінен алынған G мәні. Графеннің бір-төрт қабаты үшін C мәндері 0,081, 0,171, 0,241 және 0,309 ретінде алынады, оларды келесідей орнатуға болады:

$$C = 0.0778x + 0.005. \quad (2.4)$$

Мұнда, x - графен қабаттарының саны және субстрат үшін $x = 0$ ретінде қабылданады. Бұл суреттен эксперименттік мәндердің теориялық нәтижелерге жақсы сәйкес келетінін көруге болады.[24]

Екі өлшемді материалдардың қалыңдығын анықтау үшін оптикалық бейнелеуді кейбір басқа зерттеу топтары жүргізді. Роддаро және басқалар шағылысу спектрін RGB арналарына түрлендіруге және графен қалыңдығының өзгеруін R, G және B мәндері арқылы бақылауға болатын идеяны ұсынды; бірақ оларға сандық талдау жасамады. Бруна және басқалар монохроматикалық кескінді қолдану арқылы графеннің қалыңдығын талдады және оларды талдау үшін арнайы жарық көзі қажет болды. Гао, Чен басқада ғалымдар графеннің қалыңдығын анықтау үшін шағылысу спектрлері мен Халықаралық жарықтандыру комиссиясының кеңістігінің тіркесіміне негізделген түс айырмашылығы әдісін қолданды. Олардың әдістерінен біздің айырмашылығы, біз RGB арналарының арасынан ең жоғары контрастқа ие белгілі бір арнаны таңдаймыз және бұл графен үлгілерінің контрастының ажыратымдылығын арттырады. Сонымен қатар, түс айырмашылығын күрделі есептеу қажет емес. Li және басқалар MoS₂ бір-үш қабатын анықтау үшін R мәндерін пайдаланды, дегенмен, олар контраст мәніндегі сандық талдауды жүргізбеді.[20]

Біз осы зерттеулер арқылы а-ның контраст мәнін көрсеттік оның қалыңдығын анықтау үшін екі өлшемді материалды пайдалануға болатындығын айта кеттік. Контраст мәнін үлгі мен субстраттың оптикалық кескіндерінің әрбір пикселіндегі R, G және B мәндерін оқу арқылы оңай алуға болады және бұл мән үлгі қалыңдығының артуымен сызықты түрде артады, G мәндері графен үшін жақсы жұмыс істейді. SiO₂(285 нм)/Si субстрат және R мәндері SiO₂(300 нм)/Si субстратта MoS₂ үшін ең жақсы жұмыс істейді. GO және азот қосылған графеннің қалыңдығы демонстрация үшін қосымша тексеріледі. Сондай-ақ, әртүрлі

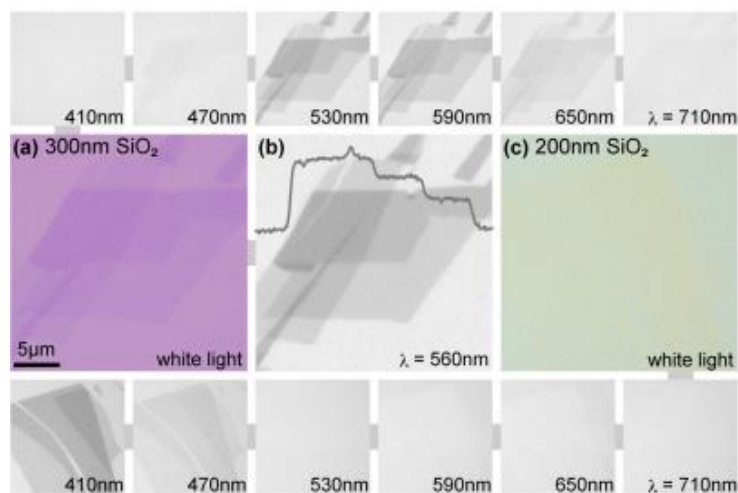
субстраттарға тасымалданған кезде оның қалыңдығын анықтау үшін графен үшін RGB арнасын таңдауды ұсынуға болады. Бұл әдіс жылдам, оңай орындалады және қымбат жабдықты қажет етпейді, бұл ауқымды үлгілерді өндіру үшін маңызды болады. Екі өлшемді материалдардың қалыңдығын анықтау іргелі зерттеулерде және болашақта қолдануда үлкен көмек береді.[20]

2.4 Толық ішкі шағылу кезіндегі графеннің поляризацияға тәуелді оптикалық абсорбциясы. Графенді көрінетін ету

2004 жылы хабарланғаннан бері графен - көміртегінің бір атомды қалың жалпақ аллотропы - қызығушылықты арттырып келеді. Бұл қызығушылық қосымшалардың шынайы уәделерімен де, осы материалдың тамаша электрондық қасиеттерімен де расталады. Ол жоғары кристалдық сапаны, субмикрондық масштабта баллистикалық тасымалдауды (тіпті қоршаған орта жағдайында) көрсетеді және оның заряд тасымалдаушылары массасыз фермиондарды дәл еліктейді. Қазіргі уақытта тәжірибеде қолданылатын графен үлгілері әдетте графиттің микромеханикалық ыдырауы арқылы жасалады: бұл қатты қабатталған материалды басқа бетке жайлап ысқылау арқылы кесуге арналған эвфемизм. Осындай қарапайым процедурамен графен жасау мүмкіндігі графит алғаш рет өндіріліп, 1565 жылы қарындаш ойлап табылғалы бері сансыз көп рет өндіріліп келеді.[25]

Графен қарындашты пайдаланған сайын өндірілетін болса да, бөлшектеу кезінде пайда болатын миллиондаған қалың графитті үлпектердің «шөпінен» шағын графен кристаллиттерін табу өте қиын. Шындығында, ешбір заманауи визуализация техникасы (соның ішінде атомдық күш, сканерлеуші туннельдеу және электронды микроскопиялар) графенді табуға мүмкіндік бермейді, өйткені олардың қажетті атомдық рұқсатта өте төмен өткізу қабілеті немесе атомды ажырататын айқын қолтаңбалары жоқ қалың үлпектерден тұратын моноқабаттар. Тіпті жақында өзін графен моноқабаттарын ажыратудың қуатты құралы ретінде көрсеткен Raman микроскопиясы әлі графен кристаллиттерін іздеуге мүмкіндік беретіндей етіп автоматтандырылған жоқ. Осы уақытқа дейін графенді оқшаулаудың жалғыз жолы - тотыққан Si пластинкасының үстіндегі графитті кесіп, содан кейін оның бетін оптикалық микроскопта мұқият сканерлеу. Жұқа үлпектер оптикалық жолға қосу үшін жеткілікті мөлдір, бұл бос вафлиге қатысты олардың интерференциялық түсін өзгертеді. SiO₂-нің белгілі бір қалыңдығы үшін, тіпті бір қабаттың өзі жеткілікті, әлсіз болса да, адам миының кескінді өңдеудің орасан зор күші шашыраңқы қалың үлпектердің арасынан бірнеше микрон өлшемді графен кристаллиттерін анықтауға мүмкіндік беретін жеткілікті контрастты беретіні анықталды. Әзірге бұл анықтау әдістемесі SiO₂ қалыңдығы

300нм (күлгіннен күлгінге дейін) үшін ғана көрсетілді және кеңінен қолданылды, бірақ қалыңдықтың 5% өзгеруі (315нм дейін) контрастты айтарлықтай төмендетуі мүмкін. Сонымен қатар, номиналды түрде бірдей бақылау жағдайларында графеннің көрінуі бір зертханадан екіншісіне қатты өзгереді (мысалы, Refs-тегі бір қабатты графеннің суреттерін қараңыз) және анекдотикалық дәлелдер мұндай күрт айырмашылықтарды әртүрлі камераларға жатқызады. Бұл контрасттың шығу тегін түсіну анықтау әдістемесін оңтайландыру және оны әртүрлі субстраттарға кеңейту, зерттеу аймағындағы тәжірибелік прогреске көмектесу үшін өте маңызды(2.10 – суретте көрсетілген).[25]

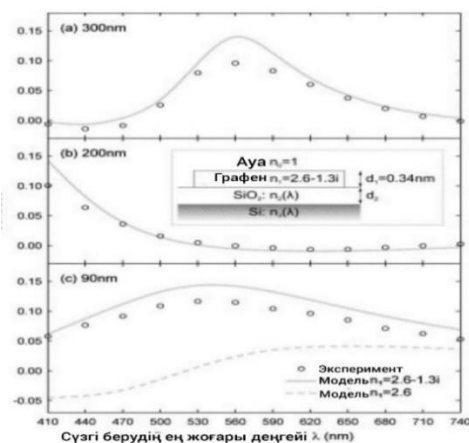


2.10 Сурет - SiO₂ кескініндегі графен кристаллиттері

300 нм SiO₂ кескініндегі графен кристаллиттері ақ жарықпен (a), жасыл жарықпен (b) және ақ жарықпен кескінделген 200 нм SiO₂ бойынша басқа графен үлгісімен (c). Бір қабатты графен сол жақтағы суретте анық көрінеді (a), бірақ оң жақта (c) тіпті 3 қабатты да байқалмайды. Кескін өлшемдері 25×25µm. Үстіңгі және астыңғы панельдер сәйкесінше (a) және (c) тармақтарындағыдай қабыршақтарды көрсетеді, бірақ өткізу қабілеттілігі 10 нм болатын әртүрлі тар жолақты сүзгілер арқылы жарықтандырылады. Қабаттар санының артуымен графеннің көрінуіндегі өзгерістерді көруге болатындай етіп әр түрлі қалыңдықтағы аймақтарды қамтитын етіп таңдалған. (b) ізі 1, 2 және 3 қабаттар үшін контрасттың қадамдық өзгерістерін көрсетеді (10 пиксельдік сызықтар бойынша орташа алынған із). Бұл контрастты берілген субстраттағы графен қабаттарының санын анықтау үшін сандық құрал ретінде де қолдануға болатындығын дәлелдейді.

Бұл талқылауда біз осы оптикалық контрасттың пайда болуын талқылаймыз және оның оптикалық жолдың жоғарылауына ғана емес, сонымен қатар графеннің айтарлықтай мөлдірлігіне байланысты пайда болатынын көрсетеміз. Френель заңына негізделген модельді қолдану арқылы біз контрасттың SiO₂ қалыңдығына және жарық толқынының ұзындығына, λ тәуелділігін зерттедік және біздің эксперименттер теориямен тамаша сәйкес келетінін көрсетті. Бұл түсінік бізге контрастты барынша арттыруға және тар жолақты сүзгілерді қолдану арқылы SiO₂-нің кез келген қалыңдығына, сондай-ақ Si₃N₄ және PMMA сияқты басқа жұқа қабықшаларға арналған графен кристаллиттерін табуға мүмкіндік берді.[25]

2.10-сурет біздің негізгі қорытындыларымызды көрсетеді. Ол микроскопта (100×, 0,9 сандық апертурасы бар Nikon Eclipse LV100D, NA, объективті) қаралған графенді SiO₂ стандартты қалыңдығы 300 нм болатын Si пластинкасының үстінде қалыпты ақ жарықпен көрсетеді (2.10a-сурет). Салыстыру үшін 2.10c-сурет ұқсас үлгіні көрсетеді, бірақ графен мүлдем көрінбейтін 200 нм SiO₂ үстінде. Біздің тәжірибемізде 200 нм SiO₂ үстінде ақ жарықта қалыңдығы 10 қабаттан асатын үлпектерді ғана табуға болады. 10 қабатты қалыңдығы графеннен көлемді графитке жалпы қабылданған ауысуды белгілейтінін ескеріңіз. 2.10-суреттегі жоғарғы және төменгі панельдер бірдей үлгілерді көрсетеді, бірақ әртүрлі тар жолақты сүзгілер арқылы жарықтандырылады. Екі қабыршық та қазір анық көрінеді. 300 нм SiO₂ үшін негізгі контраст жасыл түспен көрінеді (2.10b-суретті қараңыз), ал қабыршақ көк жарықта анықталмайды. Салыстыру үшін, көк сүзгіні пайдалану графенді 200 нм SiO₂ үстінен де көрінетін етеді (2.11 – суретте көрсетілген).[26]



2.11 Сурет - SiO₂ үш түрлі қалыңдығы үшін толқын ұзындығының функциясы ретінде контраст. Шеңберлер эксперименттік деректер болып табылады; есептеулерді қисық сызады

Байқалған контрастты түсіндіру үшін ауадан (сыну көрсеткіші, $n_0 = 1$) графен, SiO₂ және Si тұратын үш қабатты құрылымға қалыпты жарық түсу жағдайын қарастырамыз (2.11-суреттің кірісін қараңыз). Si қабаты жартылай шексіз деп есептеледі және $n_3(\lambda)$ декіндегі күрделі сынумен сипатталады, бұл маңыздысы λ -ға тәуелді (мысалы, $n_3(\lambda = 400\text{nm}) \approx 5,6 - 0,4i$). SiO₂ қабаты d_2 қалыңдығымен және басқа λ -тәуелді сыну көрсеткіші $n_2(\lambda)$ арқылы сипатталады, бірақ тек нақты бөлігімен ($n_2(400\text{nm}) \approx 1,47$). Бұл $n_2(\lambda)$ және $n_3(\lambda)$ тотыққан Si пластиналары үшін интерференциялық түстердің барлық диапазонын дәл сипаттайтынын ескереміз. Бірқабатты графеннің қалыңдығы d_1 π орбитальдарының жазықтықтан ұзаруына тең ($d_1 = 0,34$ нм) және күрделі сыну

көрсеткіші $n_1(\lambda)$ деп есептеледі. Есептеулерімізде $n_1(\lambda)$ сәйкес параметр ретінде пайдаланылуы мүмкін болғанымен, біз бұл белгісіздіктен біздің нәтижелеріміз $n_1(\lambda) \approx 2,6 - 1,3i$ көлемді графиттің сыну көрсеткішімен жақсы сипатталғанын анықтағаннан кейін аулақ болдық. λ -ға тәуелсіз. Бұл графиттің графин жазықтықтарына параллель электр өрісімен оптикалық реакциясының жазықтықтағы электромагниттік реакцияның басым болуымен байланыстыруға болады.[26]

Тақырыпшаны қорытындылай келе біз графеннің әсерінен жарық қарқындылығының өзгеруі салыстырмалы түрде аз екенін атап өтеміз және бұл байқалған контрастты графен қабаттарының санын өлшеу үшін пайдалануға мүмкіндік береді (теориялық тұрғыдан, көп қабатты графенді жазықтықтардың сәйкес санымен модельдеуге болады). d_1 арқылы бөлінген). 2.10a-суреттегі із қабаттар санына байланысты контрасттың қалай өзгеретінін көрсетеді, ал анық квантталған платолар бізде бір, екі және үш қабатты графен аймақтары бар екенін көрсетеді. Сонымен қатар, басқа оқшаулағыштарға бірдей тәсілді кеңейту арқылы біз көк жарықты пайдаланып 50 нм Si₃N₄ және ақ жарықты пайдаланып 90 нм PMMA графенін таба алдық.[26]

2.5 Графендік фотоника және оптоэлектроника

Графеннің екі өлшемді құрылымы арқылы таралатын электрондар сызықтық энергия-импульстік қатынасы бар массасы жоқ Дирак фермиондары сияқты әрекет етеді. Демек, графен релятивистік емес Дирак теңдеуімен сипатталған зарядталған бөлшектердің екі өлшемді (2d) газы үшін электронды қасиеттерді көрсетеді, ал тасымалдаушылары бөлшектерді имитациялайтын эффективті массасы релятивистік емес Шродингер теңдеуіне қарағанда, нөлдік масса және тиімді «жарық жылдамдығы» $\sim 10^6$ м/с.[27]

Графен екі өлшемді Дирак фермиондарына тән әртүрлі тасымалдау құбылыстарын анықтады, мысалы, нақты бүтін және бөлшек кванттық Холл эффекттері, тіпті тасымалдаушы концентрациясы нөлге ұмтылған кезде де «минимум» өткізгіштік $\sim 4e^2/сaғ$, Шубников зерттеулерінде Хаас тербелістері Берри фазасына байланысты фазалық ығысу π . Қозғалғыштық, μ , 10бсм²/В с дейін ілулі үлгілерде байқалады. Бұл бөлме температурасында жақын баллистикалық тасымалдаумен бірге графенді наноэлектроника үшін, әсіресе жоғары жиілік үшін әлеуетті әсер етеді.[27]

Графен сонымен қатар керемет оптикалық қасиеттерді көрсетеді. Бір атомның қалыңдығына қарамастан, оны оптикалық түрде көруге болады. Оның өткізгіштігін жұқа құрылым константасы арқылы көрсетуге болады. Dirac электрондарының сызықтық дисперсиясы кең жолақты қолданбаларға мүмкіндік

береді. Қаныққан абсорбция Паули блокауының салдары ретінде байқалады, тепе-теңдіксіз тасымалдаушылар ыстық люминесценцияға әкеледі. Химиялық және физикалық өңдеулер де фотолюминесценцияға мүмкіндік береді. Бұл қасиеттер оны тамаша фотоникалық және оптоэлектрондық материалға айналдырады.[27]

Графенді екі негізгі бағыт бойынша жолақ саңылауын индукциялау арқылы люминесцентті етуге болады. Біреуі оны таспалар мен кванттық нүктелерге кесу арқылы, екіншісі π электрондар желісінің қосылуын азайту үшін химиялық немесе физикалық өңдеулер арқылы люминесцентті етуге болады. Графен нанориббондары (GNRs) әртүрлі жолақ аралықтары бар өндірілгеніне қарамастан, бүгінгі күнге дейін олардан фотолюминесценция (ФЛ) хабарланбаған. Дегенмен, көлемді графен оксиді (ГО) дисперсиялары мен қатты заттар кең ФЛ көрсетеді. Жеке графен үлпектерін жұмсақ оттегі плазмасымен өңдеу арқылы жарқын люминесцентті жасауға болады. Алынған ФЛ суретте көрсетілгендей үлкен аумақтарда біркелкі болады. Гибридті құрылымдарды тек үстіңгі қабатты ою арқылы жасауға болады, сонымен қатар астындағы қабаттар бұзылмайды. Фотолюминесцентті және өткізгіш қабаттардың бұл комбинациясы сэндвичтік жарық шығаратын диодтарда қолданылуы мүмкін. Люминесцентті графен негізіндегі материалдарды енді инфрақызыл (ИК), көрінетін және көк спектрлік диапазонды қамтитын жүйелі түрде шығаруға болады.[27]

Оптикалық шектегіштер (ОШ) төмен түсетін жарық қарқындылығы үшін жоғары өткізгіштігі бар құрылғылар және жоғары қарқындылық үшін керісінше. ОШ негізінен оптикалық сенсорлар мен адамның көзін қорғау үшін үлкен қызығушылық тудырады, өйткені қарқындылық шекті мәннен асқан кезде зақым болуы мүмкін. Сызықты емес оптикалық материалды пайдаланатын пассивті ОШ қарапайымдылық, жинақылық және төмен құны үшін әлеуеті бар. Дегенмен, әзірге көзді және басқа жалпы сенсорларды бүкіл көрінетін және диапазонында қорғай алатын пассивті ОШ демонстрациясы жоқ. Типтік ОШ материалдарына жартылай өткізгіштер (мысалы, ZnSe, InSb), органикалық молекулалар (мысалы, фталоцианиндер), ЛС және көміртегі негізіндегі композиттер (мысалы, көміртегі-қара дисперсиялар, CNTs, толық. Фуллерендер және олардың туындылары және CNT дисперсиялары жақсы ОШ өнімділігіне ие, әсіресе ns импульстар 532 және 1064нм.[27]

Графен негізіндегі ОШ-де жұтылатын жарық энергиясы жылуға айналады, көпіршіктер мен микроплазмалар жасайды, нәтижесінде беріліс азаяды. Графен дисперсиялары көрінетін және жабатын кең жолақты ОШ ретінде пайдаланылуы мүмкін. НС импульстары үшін LPE графенінің кең ОШ (532-ден 1064нм-ге дейін) хабарланды. Функционалдандырылған графен дисперсиялары С60-тан асып түсетіні көрсетілді.[27]

Графен пленкалары мен композиттері тартымды электрондық және оптикалық қасиеттерге ие, бұл оларды фотоника мен оптоэлектроника үшін өте

қолайлы етеді. Бірқатар қолданбалар ІТО және басқа мөлдір өткізгіштерді ауыстыру ретінде графенді пайдалану арқылы қосылады. Көптеген жағдайларда (мысалы, сенсорлық экрандар, OLED-тер) бұл экономикалық артықшылықтардан басқа, өндірістің икемділігін қосады. Ағымдағы PDLC негізіндегі құрылғылар үлкен мөлдір электродтар талабына байланысты өндіру шығындарына байланысты үлкен қиындықтарға тап болады. Графенге негізделген технологияға көшу оларды өміршең ете алады. Күн батареяларына арналған икемді субстраттардағы жаңа графен негізіндегі мөлдір электродтар мөлдір өткізгіштер мен қатты шыны субстраттармен мүмкін емес құндылық пен жұмыс икемділігін қоса алады. Графеннің өсуі мен дисперсиялық өңдеуіндегі соңғы жетістіктер бұл материалды өнеркәсіптік қолдануды ынталандыратын «кәрілікке» айналдырды. Графен қабаттарының ерікті субстраттарға нақты орналасуын анықтау және берілген бұрыштарда моноқабаттарды жеке құрастыру арқылы көп қабатты орнату мүмкін. Құлақсыз оптикалық құрылғылардағы болашақ күш-жігер графеннің ультра кең жолақты мүмкіндігін толығымен пайдалану үшін әртүрлі толқын ұзындығындағы демонстранттарға бағытталады. Ультразылым және реттелетін лазерлер бұл салаға кіретін топтар саны күннен күнге өсіп жатқан шындық. Графен фотоникасының плазмоникамен үйлесуі әртүрлі жетілдірілген құрылғыларды іске қосуға мүмкіндік береді.[27]

2.6 Графендегі фотовольтты күшті плазмоникалық жақсарту

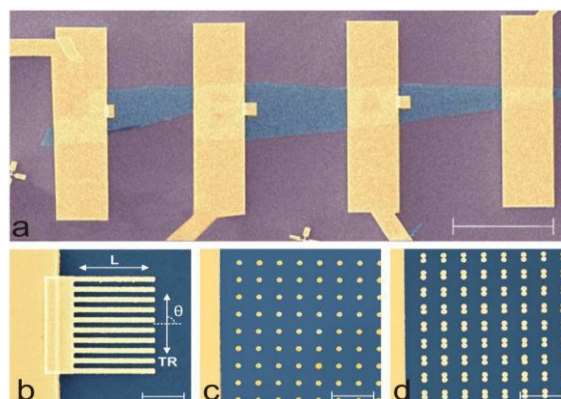
Графен негізіндегі фотодетекторлар кванттық тиімділік пен реакция уақыты бойынша тамаша сипаттамаларға ие, бұл материалдағы заряд тасымалдаушылардың өте үлкен бөлме температурасындағы қозғалғыштығы мен жоғары Ферми жылдамдығына байланысты. Жарықтың ағымға айналуының нақты механизмі әлі де талқыланса да, фото-генерацияланған электронды тесік жұптарын бөлу үшін әдетте p-n өтуі қажет. Мұндай түйіспелер көбінесе металл мен графеннің жұмыс функциясының айырмашылығына байланысты контактілерге жақын жерде жасалады. Фототок генерациялау механизмі қандай болса да, мұндай құрылғылардың барлығы келесі үш мәселеден зардап шегеді: (1) графеннің төмен жарық жұтуы (қалыпты түскен жарықтың 2,3%); (2) фотоэлектрондарды алу қиындығы (pn түйісуінің аз ғана ауданы). ток генерациясына ықпал етеді); (3) құрылғының екі контактісінде біркелкі су тасқыны жарықтандыру жағдайы үшін фототоктың болмауы. Түйісулер әртүрлі материалдардан жасалмаса, екі контактіде де өндірілетін кернеу/ток симметрия себептері бойынша қарама-қарсы полярлық, нәтижесінде нөлдік таза сигнал ретінде көрсетіледі. Бұл шектеулерді еңсерудің бір ықтимал жолы контактілердің жанында орналасқан плазмоникалық наноқұрылымдарды пайдалану болып

табылады. Мұндай наноқұрылымдармен жұтылатын инциденттік жарық жергілікті электр өрісінің күрт күшеюіне әкелетін плазмоникалық тербелістерге тиімді түрленеді. Бұл процесті тек жақын аймақта болатын жойылатын фотондардың генерациясы ретінде қарастыруға болады. Графенде түзілген p-n түйісу аймағында дәл осындай өрісті жақсарту графен негізіндегі фотодетекторлардың өнімділігін айтарлықтай жақсартуға әкелуі мүмкін. Сондықтан плазмоникалық нанос құрылымдардың рөлі түскен электромагниттік таза энергияны p-n түйісу аймағына тікелей бағыттау болып табылады. Мұнда біз мұндай құрылғылардың тиімділігі дәстүрлі құрылғыларға қарағанда 20 есе жоғары болуы мүмкін екенін көрсетеміз.[28]

Біз графиттің микромеханикалық қабыршақтануымен дайындалған графенді қолдандық. Біздің үлпектердің бір қабатты табиғаты оптикалық контраст, Раман спектроскопиясы және Quantum Hall Effect өлшемдерінің комбинациясы арқылы расталды. Ti/Au (3нм Ti, 80нм Au) контактілері e-сәулелік литография, электронды сәулені булану және көтеру арқылы қалыптасты. 2.12a-суретте алынған құрылғылардың орналасуы көрсетілген. Осындай 2-терминалды құрылғылардың макроскопиялық контактілерінің біріне жақын әртүрлі наноқұрылымдар жасалған (мысалдар 2.12б,д-суретте көрсетілген). Құрылымдардың орналасуы мен құрамы көрінетін диапазонда күшті жарық сіңіру үшін таңдалған және біз бұрын плазмоникалық қара денеге қол жеткізу үшін жобалағанға ұқсас, нәтижесінде түскен көрінетін жарықтың толық дерлік сіңірілуіне әкеледі. Біз бірнеше дизайнды қолдандық, бірақ бұл жерде біз ең жақсы өнімділікті беретін бір нақты құрылымға (саусақ ені 110 нм тор; 300 нм кадамды сурет 2.12б) назар аударамыз.[29]

Біздің құрылғылардың жергілікті фотовольтты және фототок реакциясы бірнеше лазерлерді микроскопқа қосу және жарықтандыру нүктесінің орнын сканерлеу арқылы өлшенеді. Нановольтметр Keithley 2182A құрылғы терминалдарындағы фотовольтты қосымша Keithley 2400 Sourcemeter көмегімен тіркеу үшін пайдаланылады, бұл қақпа кернеуін басқаруға мүмкіндік береді. 457, 488, 514, 633 және 785 нм жарық көп толқын ұзындығы Ar⁺, He-Ne және қатты күйдегі үзінді лазерлер үлгіге Leica DM LM микроскопы және 100x ультра ұзын жұмыс қашықтығы объектісі арқылы қосылады. ~1,5 мкм нүкте өлшемі. P1 пьезоэлектрлік кезеңі үлгіні 200 нм кадамдармен x/y-бағыттары бойынша лазерлік нүктеге қатысты аударады, нәтижесінде жасалған фотовольттың орналасуына байланысты жазылады. Өлшеу бөлме температурасында қоршаған орта атмосферасында жүргізіледі. Бұл бізге түсетін жарықтың қарқындылығына, толқын ұзындығына және поляризациясына, сондай-ақ қақпа кернеуіне фотовольт жасының тәуелділігін өлшеуге мүмкіндік береді. Үлгілердегі лазер қуаты ~30 мкВт сақталады. Бұл қуатта фотовольтты сигнал термоқуатқа қатысты кез келген сигналдан үлкенірек болады (түскен қуатты өзгерту арқылы тексеріледі). Бұл лазер қарқындылығы үлгілердің қызып кетуіне жол бермеу үшін жеткілікті төмен

(бұл бізге сызықтық режимдегі жұмыс). Раман спектрлері үлгіден шашыраған жарықты Ренишоу Раман спектрометріне қосу арқылы да жиналады(2.12 – суретте көрсетілген).[30]



2.12 Сурет - SEM микросуреті

- а) Үлгілеріміздің бірінің SEM микросуреті (жасанды түстермен). Күлгін: SiO₂ (300нм); көкшіл: графен; сары: Ti/Au электродтары. Масштаб жолағы 20 мкм.
b-d) Өртүрлі тексерілген плазмоникалық нанокұрылымдармен контактілерді жару (жасанды түстерде).

Тақырыпшаны қорытындылай келе, плазмоникалық нанокұрылымдардың көмегімен жарық жинау фотовольтты сигналды жақсартуға көмектеседі және мұндай құрылғыларды су тасқыны кезінде жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Қажетті толқын ұзындығында резонансты геометриялық нанокұрылымдарды графен негізіндегі фотодетекторларда селективті күшейту, жарықты сүзу және анықтау мүмкіндігін азайту, сонымен қатар жоғары жұмыс жиіліктерінде бір құрылғыда поляризацияны анықтау үшін пайдалануға болады. Жиілік өнімділігін дәстүрлі құрылғылармен салыстырғанда тіпті жақсартуға болады, өйткені пасмоникалық құрылымдар сыйымдылыққа (fF фракциялары) шамалы ғана үлес қосады, бірақ контакт кедергісін айтарлықтай төмендете алады. Біз мұндай плазмоникалық нанокұрылымдарды одан әрі оңтайландыру (мысалы, біріктірілген немесе каскадты плазмондық резонанстарды пайдалану) фотовольтты одан да жоғары арттыруға әкелуі мүмкін деп санаймыз.[28]

2.7 Графеннің оптикалық өткізгіштігін өлшеу

Графен, sp^2 -гибридтелген көміртектің бір қабаты, әсіресе қарапайым оптикалық жұтылу спектрін көрсетеді деп болжанған. Инфрақызылдан көрінетін спектрлік диапазонда күтілетін жұту жиілікке тәуелсіз және $\alpha = 2,293\%$

шамасына ие болу үшін есептелді, мұнда $\alpha = e^2 / \hbar$ с ұсақ құрылым тұрақтысын білдіреді (cgs бірліктерімен).). Графен диапазонының құрылымының егжей-тегжейлері әсер етпейтін мұндай әмбебап абсорбцияның болжамы жиілікке тәуелсіз $\sigma = \pi G_0 / 4$ мәнін көрсететін графен үшін оптикалық парақтың өткізгіштігіне тең, мұнда $G_0 = 2e^2/h$ өткізгіштік кванты. Ферми энергиясына жақын сызықтық дисперсиясы бар графеннің көптеген электрондық қасиеттерін массасы жоқ Дирак фермиондары тұрғысынан модельдеуге болады. Осы контексте болжанған өткізгіштікті екі өлшемді массасы жоқ фермиондардың меншікті қасиеті ретінде қарастыруға болады. Ол хиральды резонанстан туындайды, фотонды жұту кезінде бөлшек-антибөлшек жұбы құрылатын процесс және графеннің нәтижесі оның төрт еселенген спиндік-түйіндік дегенерациясын қарастырғанда тікелей келеді. Бұл әмбебап оптикалық өткізгіштік графеннің ең аз тұрақты ток өткізгіштігінің жоғары жиілікті аналогы ретінде қарастырылуы мүмкін, бұл жақында көп назар аударылған тақырып. Ең төменгі тұрақты ток өткізгіштігі G_0 ретіндегі мәнге ие болу үшін эксперименталды түрде өлшенді. Дегенмен, құндылықтың әмбебаптығы оның жергілікті үлгі ортасына сезімталдығына байланысты әлі де талқылануда. Керісінше, әр түрлі заряд тығыздықтарындағы графеннің оптикалық парағының өткізгіштігінің салыстырмалы өзгеруі жақында орта инфрақызыл диапазонда көрсетілсе де, жоғары фотондық энергиялар үшін оның мәні үлгінің жергілікті ортасына сезімталдықты аз көрсетеді деп күтеміз. әмбебап мінез-құлық көрсетеді.[29]

Бұл тақырыпшада біз графеннің оптикалық өткізгіштігін 0,2 – 1,2 эВ спектрлік диапазондағы эксперименталды анықтауды ұсынамыз. Нәтижелер мөлдір субстратта дайындалған үлкен аумақты, бір кристалды графен үлгілерінің оптикалық берілісін және шағылысуын тікелей өлшеу арқылы алынды. 0,5 – 1,2 эВ спектрлік диапазонында біз $A = (2,3 \pm 0,2)\% = (1,0 \pm 0,1) \pi\alpha$ жиілікке тәуелсіз жұтылуды немесе $\sigma = (6,1 \pm 0,6) \times 10^{-5} S = \text{парақ өткізгіштігін байқаймыз. } (1,0 \pm 0,1) \pi G_0/4$, жолақаралық ауысулардың идеалдандырылған үлгісіне сәйкес. Нәтижелер әртүрлі графен үлгілері үшін қайта шығарылды, бұл сәйкес спектрлік диапазондағы оптикалық өткізгіштікті сенімді шама ретінде көрсетті. Әмбебап мінез-құлықтың анық бұзылуы өлшеулер 0,2 эВ фотондық энергияға дейін ұзартылған кезде байқалды. Осы төменгі фотондық энергиялар үшін абсорбцияда айтарлықтай спектрлік вариация, сондай-ақ әртүрлі үлгілер көрсеткен жауаптағы айырмашылықтар байқалды. Біз бұл ауытқуларды идеалдандырылған нәтижеден ақырғы температураның әсерлерін және химиялық потенциалдың заряд-бейтараптық (Дирак) нүктесінен легирлеуден туындаған ығысуын ескере отырып есептей аламыз. Осылайша, сәйкес спектрлік диапазондағы графендегі оптикалық өткізгіштіктің идеалды, әмбебап мінез-құлықтың тексерумен қатар, бұл жұмыста біз соңғы температура мен допинг арқылы қойылған шектеулерді анықтаймыз.[30]

Өлшемдерімізде біз SiO₂ субстраттарында (Chemglass, Inc) қолдау көрсетілетін графен үлгілерін зерттедік. Метанолдағы ультрадыбыспен

субстраттарды мұқият тазалағаннан кейін графен үлгілері Киш графитінің механикалық қабыршақтануымен тұндырылды. Төменде сипатталған оптикалық абсорбциялық спектрлерді пайдаланудан басқа, бір қабатты графен кристалдары бар субстрат аймақтарын анықтау үшін екі өлшемді мүмкіндігімен байланысты Раман шыңы қолданылды. Бұл аймақтардың ауданы бірнеше жүздегеннен мыңдаған мкм²-ге дейін өзгерді.[31]

Графеннің оптикалық жұтылуы жарқыраған кең жолақты сәулелену көзі ретінде Брукхавен ұлттық зертханасындағы Ұлттық синхротрондық жарық көзінің U2В сәулелік сызығын пайдаланып, жақын инфрақызыл спектрлік аймақта өткізу және шағылысу геометриясында анықталды. Үлгі арқылы өтетін немесе шағылысқан оптикалық сәулелену азотты тазарту кезінде MgCdTe детекторымен жабдықталған Nicolet микро-FTIR спектрометрімен анықталды. 32 × шағылыстыратын объектіні пайдалану арқылы синхротрондық сәулеленуді 10 мкм нүкте өлшеміне бағыттауға болады. Графеннің жұтылу және шағылыстыру спектрлері үлгі спектрін жалаң субстратпен қалыпқа келтіру арқылы алынды. Сигналдың абсолютті шамасын салыстырып тексеру ретінде біз оптикалық көз ретінде кәдімгі вольфрам галогендік шамын пайдалана отырып, 0,5 – 1,2 эВ спектрлерінің жоғарғы шетіне жақын оптикалық жауаптың тәуелсіз өлшеулерін орындадық.[32]

3 OPTISYSTEM БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖҮЙЕСІНДЕ МОДЕЛДЕУДІ ЖҮРГІЗУ

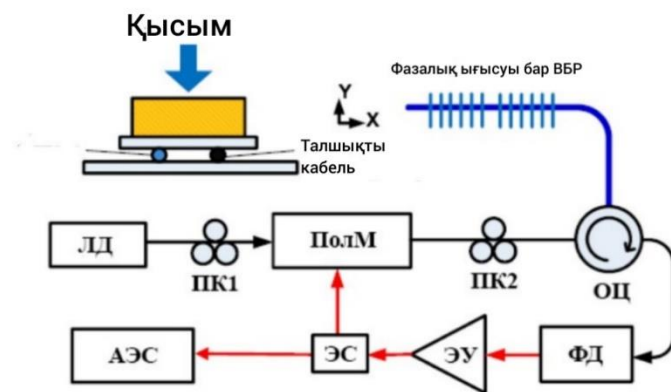
Дипломдық жұмыс барысында бізге тапсырма бойынша графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты оптикалық сенсордың модельін құрастыруымыз керек. Тақырыпты негізге ала отырып көлденең қысымды өлшеуге арналған екі жиілікті оптоэлектрондық осциллятор негізіндегі талшықты-оптикалық сенсордың компьютерлік моделін қарастырып жалпы жұмыс барысын түсіндіретін боламыз. Оптоэлектрондық осциллятор контуры қос сынуды индукциялау және екі ортогональды поляризацияланған мөлдірлік терезесін жасау үшін екі оптикалық жиілікті тудыратын бүйірлік қысым қолданылатын фазалық ығысқан ВБР торын пайдаланады. Екі оптикалық жиілік арасындағы соққы жиілігінің айырмашылығы микротолқын диапазонында жатыр және ВБР-ге түсірілген қысымның шамасына байланысты. Сезімталдық пен анықталатын ең аз қысым сәйкесінше ~ 10 ГГц/(Н/мм) және $\sim 2,5 \times 10^{-4}$ (Н/мм) болатыны модельденді. Оптоэлектронды генератордың микротолқынды құрамдас бөлігінің жоғары жиілігі мен тұрақтылығы өте сенімді және жоғары дәлдіктегі өлшеуді қамтамасыз етеді. Жиілік сұрау жүйенің жоғары жылдамдықпен жұмыс істеуіне мүмкіндік береді. Сонымен қатар, өлшемдер қоршаған орта температурасының және оптикалық тасымалдаушы толқын ұзындығының өзгеруіне сезімтал емес болады.[33]

Соңғы онжылдықтарда инженерлік құрылымдардың құрылымдық мониторингі, медициналық көмек, құбыр қауіпсіздігін бақылау сияқты кең ауқымды қолдану аясы бар талшықты Брагг торларына (ВБР) негізделген сенсорлар кеңінен зерттелді. ВБР негізіндегі сенсордың бірегей мүмкіндіктері ультра жоғары сезімталдықты, жинақылықты және мультиплекстеу мүмкіндігін қамтиды. Электромагниттік кедергілерге төзімділік ВБР сенсорын әсіресе талап етілетін өнеркәсіптік қолданбалар үшін қолайлы етеді. Әртүрлі физикалық шамалардың арасында ВБР негізіндегі сенсор тек бойлық деформацияны ғана емес, сонымен қатар инженерлік құрылымдардың құрылымдық мониторингіндегі өмірлік маңызды параметр болып табылатын көлденең қысымды да өлшей алады.[33]

Өлшеу принципі ВБР-да индукцияланған қос сынуды жасау болып табылады. Дегенмен, біркелкі ВБР өткізу жолағы әдетте қос сынумен туындаған жиілік ығысуынан әлдеқайда кең, бұл сенсорлардың анықтау сезімталдығы мен рұқсатын айтарлықтай шектейді. Осы себепті сенсор ретінде ені ~ 10 МГц мөлдірлік терезесі бар π -фазалық ауысқан ВБР пайдаланылды. π -фазаға ауысқан ВБР-ға қысым түсіргенде, ол қос сынғыш болады және мөлдірліктің тар терезесі екі бөлікке бөлінеді, олардың арасындағы қашықтық қолданылатын қысымға тікелей қатысты. Бұл мәселеге қосымша, оптикалық спектр анализаторын

пайдаланып ВБР толқын ұзындығын сұрауға негізделген сұраушылардың айтарлықтай баяу және олардың рұқсаты шектеулі екенін ескеру қажет. Электрлік спектр анализаторларын қолданатын жиілікті өлшеу әдістерінің жоғары жылдамдығы мен жоғары ажыратымдылығына байланысты өлшеулерді оптикалық аймақтан радиожілікке көшіру ұсынылады. Ол үшін π -жылжу фазасы бар ВБР мөлдірлік терезелеріне сәйкес келетін екі оптикалық жиіліктен микротолқын диапазонының айырмашылық жиілігін тудыратын оптоэлектрондық генератордың кері байланыс тізбегіне енгізіледі.[34]

3.1-суретте екі жиілікті оптоэлектронды микротолқынды генератордың негізінде ұсынылған көлденең қысым датчигінің конфигурациясы көрсетілген, оның құрамына π -жылжу фазасы бар ВБР кіреді. Лазердің оптикалық тасымалдаушысы поляризация контроллері арқылы поляризация модуляторына жіберіледі. Поляризация модуляторы – қарама-қарсы модуляция индекстері бар ортогональды бас осьтер бойымен фазалық модуляцияны қолдайтын арнайы фазалық модулятор.[35]

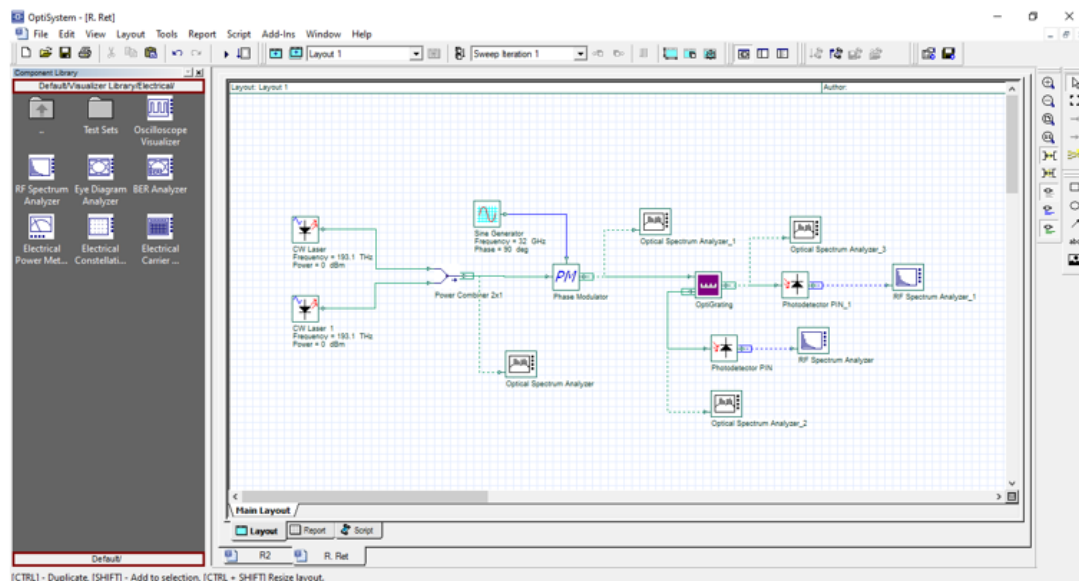


3.1 Сурет - Датчиктің оптоэлектронды генераторының конфигурациясы және моделі

Қарапайымдылық үшін біз ЛД түскен жарық ПолМ поляризация модуляторының негізгі осьтеріне 45° бұрышта поляризацияланған деп есептейміз және осылайша поляризация модуляторы екі осьті фазалық модулятор ретінде жұмыс істейді. Бірінші кезеңде басқару кернеуі модуляторға берілмейді және ОС циркуляторы арқылы π фазалық ығысуымен ВБР-ға беріледі, ОС арқылы мөлдірлік терезелері арқылы талшықтың ұшынан шағылысқан сигнал ПД фотодетекторы. Айырмашылық жиілік жасалады, ол ЕД-де күшейтіледі және ЭС электрондық сплиттері арқылы ПолМ басқару кірісіне беріледі. Содан кейін фазалық модуляцияланған сигнал оптикалық циркулятор арқылы фазалық π -жылжумен ВБР-ға жіберіледі. Анықталған электрлік сигнал оптоэлектронды микротолқынды генератордың генерациялау циклін жабу үшін электрлік

күшейткішпен күшейтілгеннен кейін қайтадан поляризация модуляторына жіберіледі.

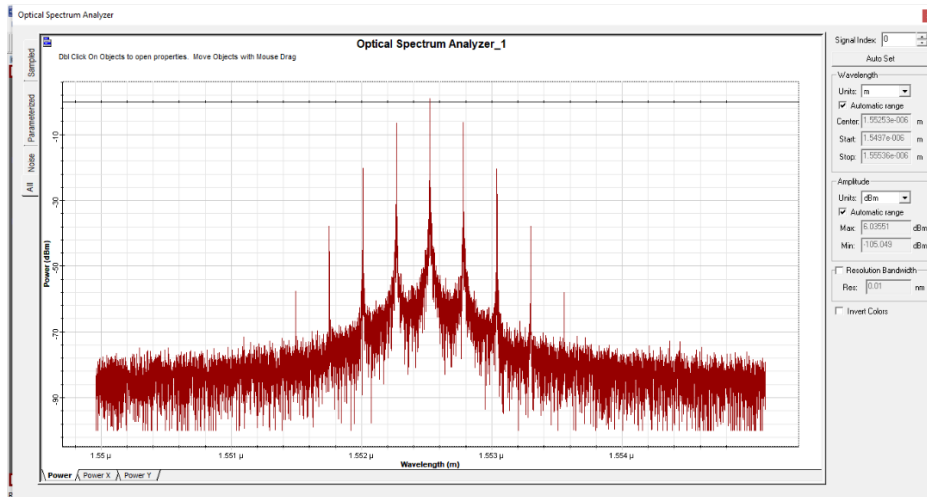
3.2 - суретте OptiSystem жүйесінде жинақталған оптоэлектронды генератор-датчиктің үлгісін көрсетеді. Модельдегі лазерлік ЛД және ПолМ екі лазермен және фазалық модулятормен ауыстырылады, олардың әрқайсысы арнаны әртүрлі көлденең қысымда модельдейді. ОС екі РД бар торлы элементпен ауыстырылады. Қадамдық есептеулер арқылы OptiGrating бағдарламасында жасалған PBR моделіне әртүрлі көлденең жүктемелер енгізілді.



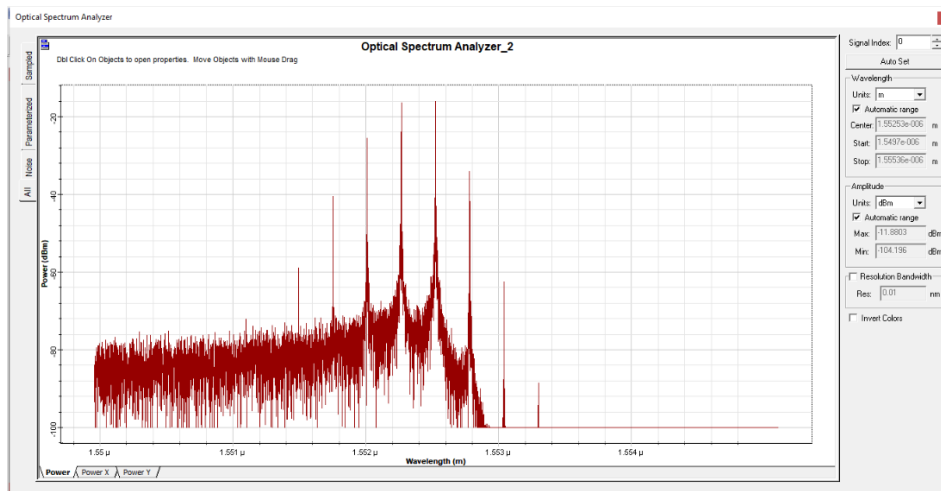
3.2 Сурет - Жиналған сенсор үлгісі

3.1 Модельдеу нәтижелері

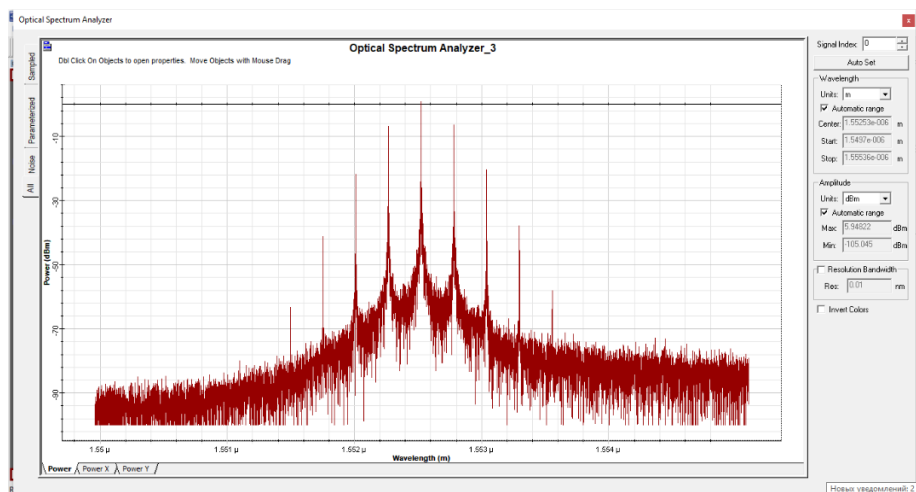
Әрі қарай 3.3 - суретте 6 көлденең қысымды қолданбай және сәйкесінше 0,00025 μ , 0.0005 μ , 0.005 μ көлденең қысымдар қатарын пайдаланбай, оптикалық спектр анализаторының шығысынан алынған графиктерді көрсетеді, мұнда $\mu=1$ Н/мм.



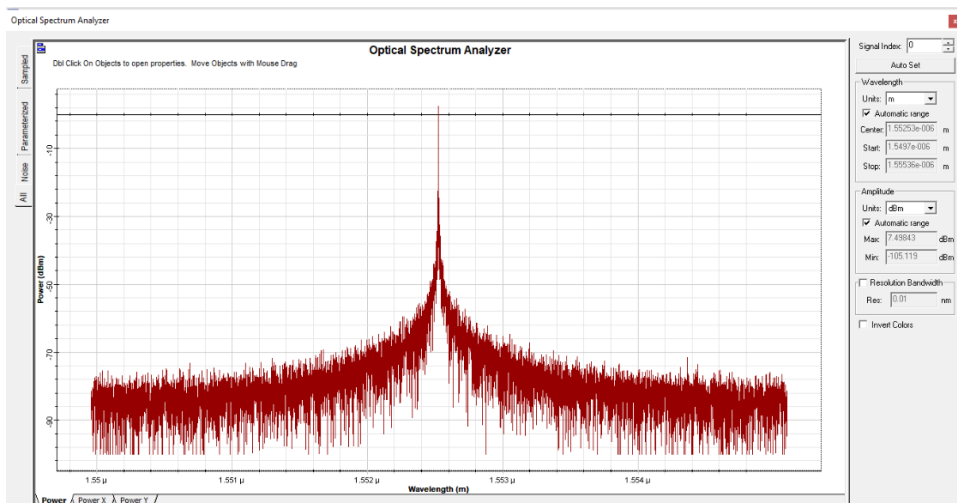
3.3 сурет - Көлденең қысымды қолданбай шығу спектрі



3.4 сурет - 0,00025μ көлденең қысымды қолдану арқылы шығыс спектрі



3.5 сурет - 0,0005 μ көлденең қысымды қолдану арқылы шығыс спектрі



3.6 сурет - 0,005 μ көлденең қысымды қолдану арқылы шығыс спектрі

ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, екі өлшемді материалдың контраст мәнін оның қалыңдығын анықтау үшін пайдалануға болатындығын көрсеттім. Контраст мәнін үлгі мен субстраттың оптикалық кескіндерінің әрбір пикселіндегі R, G және B мәндерін оқу арқылы оңай алуға болады және бұл мән үлгі қалыңдығының артуымен сызықты түрде артады, G мәндері графен үшін жақсы жұмыс істейді. SiO₂(285 нм)/Si субстрат және R мәндері SiO₂(300 нм)/Si субстратындағы MoS₂ үшін ең жақсы жұмыс істейді. G және азот қосылған графеннің қалыңдығы демонстрация үшін қосымша тексеріледі. Сондай-ақ, әртүрлі субстраттарға тасымалданған кезде оның қалыңдығын анықтау үшін графен үшін RGB арнасын таңдауды ұсынамын. Бұл әдіс жылдам, оңай орындалады және қымбат жабдықты қажет етпейді, бұл ауқымды үлгілерді өндіру үшін маңызды болады. Екі өлшемді материалдардың қалыңдығын анықтау іргелі зерттеулерде және болашақта қолдануда үлкен көмек береді.

Сонымен қатар, графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты оптикалық сенсорды негізге ала отырып оптоэлектрондық генератор негізіндегі талшықты-оптикалық көлденең қысым датчигінің компьютерлік моделін қарастырдым және эксперименталды түрде көрсеттім, оның ішінде жоғары ажыратымдылықпен сипатталатын фаза π -жылжуымен ВБР көрсетілген.

Жұмыстың негізгі тұжырымдамасы ОЭО пайдалану болды, оның ішінде π -жылжу фазасы бар ВБР, оған көлденең қысым қолданылды. Соңғы төрт графиктен көрінетіндей, көлденең қысым неғұрлым көп болған сайын, тордың мөлдірлігімен анықталатын екі оптикалық жиілік арасындағы жиілік қашықтығы да артады. Ең төменгі қысым 0,00025 μ -де тіркелді. Сенсор моделінің сезімталдығы ~ 10 ГГц/(Н/мм) болды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. A. N. Grigorenko, M. Polini, K. S. Novoselov, School of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, M13 9PL, UK 2 NEST-CNR-INFM and Scuola Normale Superiore, I-56126 Pisa, Italy (2012-2013)
2. Mak, K. F., Lee, C., Hone, J., Shan, J. & Heinz, T. F. Atomically thin MoS₂: A new direct-gap semiconductor. *Physical Review Letters* 105, 136805, doi:10.1103/PhysRevLett.105.136805 (2010).
3. Liu, M. et al. A graphene-based broadband optical modulator. *Nature* 474, 64-67, doi:10.1038/nature10067 (2011).
4. Zhang, Y. B., et al. From a direct control of the widely adjustable band spacing in two-layer graphene. 459, 820-823, doi: 10.1038 / nature08105 (2009).
5. Novoselov, K. S., et al. Quantum hall effect of room temperature in graphene. *Science* 315, 1379-1379, doi: 10.1126 / science.1137201 (2007).
6. Crassi, I. Giant Faraday's rotation in single and multilayer graphene. *Natural Physics* 7, 48-51, doi: 10.1038 / nphys1816 (2011).
7. Pereira, V. M., Ribeiro, R. M., Peres, N. M. R. & Neto, A. H. C. Optical properties of deformed graphene. *Europhysics Letters* 92, 67001, doi: 10.1209 / 0295-5075 / 92/67001 (2010).
8. www.elsevier.com/locate/ssc Department of Physics, Columbia University, New York, NY 10027, USA *Solid State Communications* 146 (2008) 351–355
9. Furch M. etc. Microporous integrated graphene photodetector. *Nano letters*, nl204512x, doi: 10.1021 / nl204512x (2012)
10. <https://www.researchgate.net/publication/257954338> Main Laboratory of Low Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, School of Physics and TEDA School of Applied Physics, Nanjing University, Tianjin 300071, China (published online on January 17, 2013)
11. Ian, H., et al. Adjustable infrared plasmonic devices using graphene / insulator stacks. *Nat Nano* 7,330-334, doi: 10.1038 / nnano.2012.59 (2012).
12. Bostwick A. etc. Control of plasmarons in quasi-involuntary mixed graphene. *Science* 328, 999-1002, doi: 10.1126 / science.1186489 (2010).
13. Gabor, N. M., et al. The hot carrier is the internal photovoltaic response in graphene. *Science* 334, 648-652, doi: 10.1126 / science.1211384 (2011).
14. Kravets, V.G. etc. Singular phase nanooptics: towards the detection of an unknown molecule. *NatMater*, sent.
15. K.I. Bolotin et al. / *Solid State Communications* 146 (2008) 351–355
16. J.G. Chekelsky, L. Lee, N.P. Ong *condmat* / 0708.1959 (2008).
17. E.H. Hwang, S.Adam, S.Das Sarma, *Phys. Rev. Lett.* 98 (2007) 186806.
18. M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Cambridge University Press, 2009).

19. Z.Ni, H.Wang, J.Kasim, H.Fan, T.Yu., Y.Wu, Y.Feng and Z.Sheng, *Nano Lett.* 7 (9), 2758–2763 (2007).
20. <https://www.researchgate.net/publication/252388009> Nano-Laboratory, Department of Electrical Engineering, University of California, Riverside, Riverside, California 92521, USA (2013)
21. A K Ferrari, J K Meyer, W. Scardachi, K. Kasiragi, M. Lazzeri, F. Mauri, S. Piskanets, D. Jiang, KS Novoselov, S. Roth and A.K. Game, *phys. Rev. Lett.* 97, 187401 2006
22. <https://www.researchgate.net/publication/233423566> Department of Physics and Applied Physics, School of Physical and Mathematical Sciences, Nanyang Technological University, Singapore, 637371, Singapore (2012)
23. Ferrari A C 2006 Raman Spectrum Graphene and Graphene Layers *Phys. Rev. Lett.* 97 187401
24. Lee C G, Yan H G, Brus L E, Heinz T F, Hone J and Ryu S M 20 Single and multilayer MoS₂ ACS Nano 4 2695–700 anomalous lattice oscillations (2010)
25. A.H. Castro Neto Department of Physics, Boston University, 590 Commonwealth Avenue, Boston, MA 02215, USA KS Novoselov, D. Jiang, R. Young, T. J. Booth, AK Game Department of Physics and Astronomy, University of Manchester , Manchester, M13 9PL, United Kingdom (2013)
26. A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Nature Materials*, 183 (2007).
27. F.Bonakkorso, Z.Sun, T.Hasan, ASFerrari Engineering Department, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FA, United Kingdom (2010)
28. T. J. Echtermeyer, L. Britnell, P. K. Jasnós, A. Lombardo, R. V. Gorbachev Center for Meso Science and Nanotechnology, University of Manchester, Oxford Road, Manchester, M13 9PL, UK (2011)
29. K.S. Novoselov et al., 438, 197 (2005)
30. Yu.B. Zhang, Yu.V. Tan, H.L. Stormer, P. Kim, 438, 1201 (2005)
31. B.Г. Kravets, F. Shchedin, A.N. Grigorenko, *phys. B.* 78, 205405 (2008)
32. Keane Fay Mac, Matthew Yu. Sphere, Yang Wu, Chun Hung Louis, James A. Malevich and Tony F. Heinz Department of Physics and Electrical Engineering, Columbia University, 538 West 120th St., New York, NY 10027, USA (2006)
Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA (2008)
33. Jones M. *Nat. Photonics.* 2008. Vol. 2, pp. 153-154.
Guo H., Xiao G., Mrad N., and Yao J.P. *Sensors.* 2011. Vol. 11, pp. 3687- 3705.
Pinet E. *Nat. Photonics.* 2008. Vol. 2, pp. 150-154.
Nakstad H. and Kringlebotn J.T. *Nat. Photonics.* 2008. Vol. 2, pp. 147-149.
34. Morozov O.G., et al. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2016, № 1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2016/3525.
LeBlanc M., Vohra S.T., Tsai T.E., and Friebele E.J. *Opt. Lett.* 1999. Vol. 24, pp. 1091-1093.

Fu H., Shu X., Mou C.B., Zhang L., He S., and Bennion I. IEEE Photon. Technol. Lett. 2009. Vol. 21, pp. 987-989.

Misbahov Rus.Sh., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4343.

Belkin M.E., Sigov A.S. Radiotekhnika i ehlektronika. 2009. Vol. 54. № 8, pp. 901–914.

35. Belkin M.E. Fundamental'nye problemy radioehlektronnogo priborostroeniya INTERMATIK-2008. Materialy mezhdunarodnoj NTK (Fundamental problems of radioelectronic means). 2008, pp. 289-297.

ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ ШІКІРІ

Дипломдық жұмыс

Ершуах Райымбек Әділбекұлы

5B071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Тақырыбы: «Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор»

Берілген бітіру жұмысында графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсорға зертеу жұмыстарын жүргізді.

Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсорды негізге ала отырып оптоэлектрондық генератор негізіндегі талшықты-оптикалық көлденең қысым датчигінің компьютерлік моделін құрастырды және эксперименталды түрде көрсетілді.

Бірінші бөлімде зерттелген ғылыми жұмыстардың негізгі тақырыптары мен бағыттары анықталды. Сонымен қатар, графен плазмоникасы – жазық жердегі оптика және графеннің, басқа екі өлшемді материалдардың оптикалық қасиеттеріне түсініктемелер жүргізілді.

Екінші бөлімде аспалы графендегі өте жоғары электрондардың қозғалғыштығына зертеу жасалды. Поляризацияға сезімтал абсорбция әсеріне негізделген мөлдір субстраттағы графеннің қабаттарын дәл анықтау бойынша әдістемелер қарастырылды.

Үшінші бөлімде Optisystem бағдарламалық жүйесінде графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор моделі құрастырылып зертеу жасалды. Оптикалық спектор анализі арқылы қорытынды графиктер алынған.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер өте орынды.

Жалпы, дипломдық жобаға "өте жақсы" (95%) деген баға, ал студент **Ершуах Райымбек Әділбекұлы** 5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші

ЭТЖҒТ, Каф.

Қауымдастырылған профессор PhD докторы

Н.К.Смайлов

(қолы)

«18» 05. 2022 ж.

Ф ҚазҰТЗУ 704-23. Пікір

РЕЦЕНЗИЯ

Дипломдық жұмыс

Ершуах Райымбек Әділбекұлы

5B071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Тақырыбы: «Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор»

Орындалды:

а) графикалық бөлім 6 бет.

б) түсіндірме жазбасы 47 бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Дипломдық жұмыста **Ершуах Райымбек** Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсорға зерттеу жүргізді. Дипломдық жұмыс келесі бөлімдерден тұрады:

Бірінші бөлімде зерттелген ғылыми жұмыстардың негізгі тақырыптары мен бағыттары анықталды.

Екінші бөлімде аспалы графендегі өте жоғары электрондардың қозғалғыштығына зерттеу жасалды. Поляризацияға сезімтал абсорбция әсеріне негізделген мөлдір субстраттағы графеннің қабаттарын дәл анықтау бойынша әдістемелер қарастырылды.

Үшінші бөлімде Optisystem бағдарламалық жүйесінде графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор моделі құрастырылып зертеу жасалды. Оптикалық спектор анализі арқылы қорытынды графиктер алынған.

Графикалық және мәтіндік материалдар МСТҚ талабына сәйкес жазылған.

Бұл дипломдық жоба жоғарға оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғарғы дәрежеде жазылған.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Жалпы, дипломдық жұмыста "өте жақсы" (95%) деген баға, ал студент **Ершуах Райымбек Әділбекұлы** мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Рецензия беруші

Алматы энергетика және байланыс университеті

Т. Ғ. Д., профессор

Якубова М.З.

«10» _____ 2022 ж.

Ф ҚазҰТЗУ 2024. Рецензия

Қолтаңбаны растаймын Подпись заверяю	
	3.0
КІЗМЕТІ	АТЫ-ЖӨНІ
23 ж	05
	2023ж.

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Ершуах Райымбек Әділбекұлы

Тақырыбы: Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор

Жетекшісі: Нуржигит Смайлов

1-ұқсастық коэффициенті (30): 1.7

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.7

Дәйексөз (35): 0.3

Әріптерді ауыстыру: 167

Аралықтар: 16

Шағын кеңістіктер: 11

Ақ белгілер: 2

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілісін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні 22.05.2022

Кафедра меңгерушісі



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ершуах Райымбек Әділбекұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Графеннің поляризацияға тәуелді сіңірілуіне негізделген талшықты-оптикалық сенсор

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 1.7

Коэффициент Подобия 2: 0.7

Микропробелы: 11

Знаки из других алфавитов: 167

Интервалы: 16

Белые Знаки: 2

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата 22.05.2022

Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Ершуах Райымбек Әділбекұлы

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Графеннің поляризацияға тәуелді сiңiрiлуiне негiзделген талшықты-оптикалық сенсор

Научный руководитель: Нуржигит Смайлов

Коэффициент Подобия 1: 1.7

Коэффициент Подобия 2: 0.7

Микропробелы: 11

Знаки из других алфавитов: 167

Интервалы: 16

Белые Знаки: 2

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

22.05.2022
Дата

 Марсупов

проверяющий эксперт

