

ГРАФЕН НАНОЭЛЕКТРОНИКАДА**Амангали Думан Амангалиулы**idoom1996@gmail.com

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Дизайн және инженерлік графика» кафедрасының 2 курс магистранты, Нұр-Сұлтан, Қазақстан
Ғылыми жектекші – Садыкова Ж.М..

Графен бірнеше жыл бұрын ғана алынды және жаңа суперматериалдар арасында жетекші орынға ие болды, сарапшылардың бағалауы бойынша қазіргі заманғы электроника мен нанотехнологияны түбегейлі өзгертуі мүмкін. Гексагоналды кристалды құрылымы бар бұл екі өлшемді материал ерекше механикалық және электрлік қасиеттерімен ерекшеленеді. Жарылу беріктігі бойынша ол болаттан 200 есе асып түседі, ал қалыңдығы бір атомдық қабатқа қалыңдығы графен пленкасының салмағы футбол алаңынан 1 Г кем. Бөлме температурасында осы материалдың меншікті электр кедергісі ~ 1 мкОм·см тең, бұл мысқа қарағанда 35% - ға аз, бөлме температурасында заряд тасығыштардың қозғалысы кремний үшін $0,15$ м²/В·с қарсы 20 м²/В·с және индий антимонидіне арналған $0,77 \cdot 10^3$ м²/В·с құрайды. Мұның бәрі графенді оның негізінде микросхемаларды, өлшеу құрылғыларын, биодатчиктерді, ультраконденсаторларды, икемді дисплейлерді және өзінің сипаттамалары бойынша қазіргі заманғы аспаптардан асып түсетін басқа да инновациялық құрылғыларды іске асыру үшін өте перспективалы етеді.

Графен дегеніміз не?

Графен (C₆₂H₂₀) – көміртегі молекулаларының біратомды қабаты – көмірсулардың әсерлі тобына жатады, оған үшөлшемді (алмаз, жартылай металл – графит), бір өлшемді (жартылай өткізгіштер немесе металдар – көміртекті нанотүбектер) және нольмерлі (фуллерендер) аллотропиялық түрлер кіреді. 60 жыл бұрын теориялық сипатталған және көміртегі негізіндегі әртүрлі материалдардың қасиеттерін сипаттау үшін кеңінен қолданылатын графен атауын алған көміртектің екі өлшемді аллотропиялық нысаны, екі өлшемді кристалдар өзінің тұрақсыздығынан өмір сүре алмайды деп есептейміз. Бұл пікір 2004 жылы Манчестер университетінің (Ұлыбритания) профессоры Андре Геймнің және Доктор К. Новоселовтың жетекшілігімен Черногловкадағы Микроэлектроника және аса таза металдар технологиясы мәселелерінің ресейлік институты ғалымдарының бірлескен күшімен графен құрылымын алып, қайта шығаруға мүмкіндік алды[1]. Алдымен ғалымдар қағаз бойынша жұмсақ графитті қарындашпен өткізді, содан кейін оны саусақ іздерін түсіретін криминалистер жасаған сияқты қарапайым скотч лентасымен "шайқады". Графит пен графеннің көптеген жұқа пленкалары бар скотч қабыршақтанғаннан кейін мұқият таңдалған қалыңдықтағы SiO₂ қабаты бар кремний төсегіне қысылған. Бұл кезде пленка алу қиын, немесе "парақ", белгілі бір өлшемдегі графен және пішін төсеніштің бекітілген аймақтарындағы. Сондықтан табыстың басты құрамдас бөлігі оптикалық микроскоптың көмегімен кремний төсенішінің бетіне ауыстырылған графиттің біратомды қабаттары үлгілерінің әлсіз интерференционды суретін табу мүмкіндігі болды. Авторлар бұл жеткілікті қарапайым емес, бірақ тиімді тәсілі сканерлеудің графен кристалдарын іздеуде, олар, бәлкім, осы күнге дейін ашпайды деп санайды. Осылайша, графен sp²-байланыстары бар атомның төрт сыртқы электрондарының үшін құрайтын гексагоналды кристалды торы бар екі өлшемді аллотропды көміртектің нысаны болып табылады. Бұл жағдайда атомның үш жақын көрші атомы бар. Байланыссыз төртінші электрондар кристалды тордың үстінде және жазықтығында созылатын тік орбиталдарда болады. Пентагональды (бескөмірлі) немесе гептагональды (жетікөмірлі) кристалдық ұяшықтардың болуы ақаулардың бар болуы белгісі болып саналады. Пентагональды ұяшықтың қатысуымен материалдың жазықтығы конусқа оралады. 12 пентагоналды ұяшықтардың болуы фуллерен қалыптастырады. Гептагоналды ұяшықтарды енгізу ершт тәрізді пішін жазықтығының қалыптасуына алып келеді.

Пентагоналды және гептагоналды ұяшықтардың бақыланатын қосылуы материалдың түрлі түрлерін қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Графеннің бірегей қасиеттері оның кристалдық және электрондық құрылымдарымен негізделген. Жартылай өткізгіштерде заряд тасығыштар (электрондар мен тесіктер) кристалды тордың периодтық өрісімен өзара әрекеттеседі, квазибөлшектердің пайда болуына әкеледі (өздерін нақты бөлшектер ретінде жүргізетін қозған күйлер). Қатты денедегі квазибөлшектердің энергиясы олардың моментіне байланысты және олардың энергетикалық жай-күйімен сипатталады. Бұл энергетикалық аймақтар энергетикалық жағдайы жоқ тыйым салынған аймаққа бөлінген.

Графеннің кристалдық құрылымы екі эквивалентті тордан тұрады, бұл валентті аймақ және өткізгіштік аймақ түйісетін K және K' тасушылардың нөлдік зарядының деңгейінде екі "коникалық" нүктенің пайда болуына әкеледі. Нәтижесінде графендегі заряд тасығыштар өзін фотондар немесе тұрақты "тиімді" жарық жылдамдығымен (Ферми жылдамдығы) $v_F \approx 10^6$ м/с масссыз квазибөлшектер ретінде жүргізеді. Бұл жағдайда электрондар мен тесіктер фермиондар, яғни. Арқаның жартылай мәні бар бөлшектер және олар зарядталған. Қазіргі уақытта белгілі элементарлық бөлшектер арасында мұндай масссыз зарядталған фермиондар үшін аналогтар жоқ.

Графен заряд тасығыштарының нөлдік салмағы олардың тек қана жоғары қозғалғыштығына – қазіргі заманғы электроникада қолдану үшін материалдың жарамдылығын сипаттайтын параметрге негізделеді. 2004 жылы алғаш рет графен ала білген а. Гейм мен К. Новоселовтың жетекшілігімен ғалымдар тобы орындаған графеннің акустикалық фотондарының шашырауы өлшемдеріне сәйкес, бөлме температурасында және 10^{12} см⁻² тасушылардың тығыздығы кезінде осы материалдағы тасушылардың қозғалмалылығының шекті мәні 20 м²/В·с құрайды. Алайда, кремний қосоксидінің қабатына салынған графен тасымалдағыштарының қозғалысын өлшеу кезінде, электрондардың төсегі фотондарымен шашырауы қозғалу мәнінің 4 м² / В * с дейін төмендеуіне алып келеді, бұл кремний мен жартылай өткізгіш қосылыстарға қарағанда бұрынғыдай көп. Температураның жоғарылауы кезінде қозғалыс құлайды. Бұл графен тамаша тегіс Парақ емес және кедір-бұдыр беті бар. Температура жоғарылаған кезде әжімдерді және графен шығыңқы дірілдейді, бұл электрондардың қозғалысын баяулатады. Гейм тобы жазық беті бар графенде электрондардың қозғалысы одан да жоғары болады деп санайды. Шынында да, қазір графеннің еркін жазатын пленкаларын алу бойынша жұмыстар жүргізілуде, бұл тасушылардың қозғалысын 200 м²/В·с дейін арттыруы тиіс. Қозғалғыштықтың алынған мәндері электрондар графенада баллистикалық (соқтығысусыз) және бөлме температурасында үлкен қашықтыққа жылжуы мүмкін екенін куәландырады. Графеннің Бұл қасиеті оны болашақ наноэлектронды жүйелердің болашағы зор материалымен жасайды [2].

Графенде тыйым салынған аймақтың болмауы оның базасында "көміртекті дала транзисторын" дайындауға болатынымен, ешқандай сыртқы кернеу осы транзисторды жаба алмайтынын білдіреді. Және бұл жерде наноэлектроникада графен зарядты тасымалдаушылардың ерекше жоғары қозғалуын қалай пайдалануға болады? Біріншіден, бұл тыйым салынған аймақты "ашу". Қазір графенада бөлме температурасында айтарлықтай енін алудың екі тәсілі белсенді зерттелуде.

Шамасы, қойылған тапсырманы қарапайым тәсілмен шешуге болады – графеннің екі торабына әртүрлі әрекет ететін әлеуетті қалыптастыру. Графеннің екі беті екі қабатты материалға біріктірілуі төрт энергетикалық аймақтың қалыптасуына әкеледі, олардың екеуі жанасады, осының арқасында мұндай материалдың әлі де тыйым салынған аймағы жоқ. Бірақ бір қабатты графенге қарағанда, екі қабатты материалда заряд тасығыштар сыртқы электр өрісін қолданғанда массаға ие болуы мүмкін, бұл тыйым салынған аймақты "ашу" және оның енін басқару мүмкіндігін куәландырады. Калифорния университетінің ғалымдары Берклидегі Фенг Вангтің басшылығымен екі қабатты графенаға салынған сыртқы кернеудің өзгеруі кезінде 0-ден 250 мВ-ға дейін материалдың тыйым салынған аймағының енін 0-ден 250 мэВ-ге дейін басқаруға болатынын көрсетті (германия мен кремнийдің тыйым салынған

аймағының ені тиісінше ~740 және 1200 мэВ құрайды). Осындай әсерлі нәтиже алу үшін екі маңызды шешім қабылданды. Біріншіден, екі зауыттық далалық транзистор жасалды, бұл тыйым салынған аймақтың еніне және материалдың электрлік легирленуін тәуелсіз басқаруға мүмкіндік берді. Нанополь Транзисторы кремний төсенішінде орындалды, ол оның төменгі қақпағы болды. Кіші қалыңдықтағы кремнийдің қос тотығының қабаты үстіңгі жағында алюминий мөлдір тотығының қабаты жағылған екі қабатты графеннің төсенішін-бекітпесін бөліп алды. Екінші затвор алюминий тотығы пленкасында өсірілген платина болды.

Екінші шешім, тыйым салынған аймақтың пайда болуын тіркеуге және оның енін басқаруға мүмкіндік берді, графеннің электрлік кедергісін өлшеуден бас тарту болды. Оның орнына Advanced Light Source (ALS) аппаратурасымен қалыптасатын синхротрондық ИК-сәуле шоғырының көмегімен графеннің оптикалық өткізу қабілеті тіркелген. Варьирова кернеу бекітпелерді, ғалымдар фиксировали өзгерту поглощаемого графеном сәулелену. Әрбір спектрдегі жұтылу шыңы бекітпенің берілген кернеуіне тыйым салынған аймақтың еніне сәйкес келді. Осылайша, Калифорния университетінің ғалымдары екі бекітпенің кернеуін тәуелсіз басқару арқылы графеннің тыйым салынған аймағының енін кең ауқымда өзгерту мүмкіндігін көрсетті және оның энергетикалық жай-күйін материалды "электрлік легирлеу" есебінен тәуелсіз тапсырудың мүмкіндігін көрсетті. Рас, жүргізілген эксперименттер графен нанoeлектроникада қолдануға жарамды екенін көрсетті. Қажетті сипаттамалары бар аспаптарды алу үшін ең алдымен материалдың тазалығын арттыру бойынша үлкен жұмыс көлемі қажет болады.

Бірақ бүгінгі таңда графендік нанолент деп аталатын нөлдік көлемдегі құрылымдарды құру есебінен бір қабатты графендегі тыйым салынған аймақты қалыптастыру тәсілі ерекше тартымды болып табылады (Graphene NanoRibbon, GNR). Зерттеулер шеттердің атомдық құрылымына байланысты – креслоға ұқсас (armchair) немесе зигзаг тәрізді (Zig-Zag) - ұзындығы оның енінен әлдеқайда көп емес графеннің наноленті металдың немесе жартылай өткізгіштің қасиеттері болуы мүмкін. Дәннің бойымен графен табағын кесу жолымен қалыптасатын наноленттердің зигзаг тәрізді құрылымы бар және металдың негізгі қасиеттерімен сипатталады, ал табакты дәннің бойымен кесу кезінде креслоға ұқсас құрылым пайда болады. Мұндай құрылымның графеналық лентасында тыйым салынған аймақ болуы мүмкін, демек, жартылай өткізгіштік қасиеттер. Сонымен қатар, Ренсселер политехникалық институтының мамандарының есептеулері көрсеткендей, тыйым салынған аймақтың енін нанолента ұзындығын өзгертіп басқаруға болады [4].

Наноленталар литография және өңдеу әдістерімен (жартылай өткізгіш аспаптар элементтері сияқты), немесе ерітіндіден графитті термиялық және ультрадыбыстық қабыршақтау және оны төсекке жағу арқылы қалыптасады.

Металл қасиеттері бар графен таспаларын алу мүмкіндігі наносхемаларда өткізгіштерді қолданудан бас тартуға мүмкіндік береді. Бұл электрондық схемаларда көміртекті нанотүсіргіштерді қолдану үшін басты кедергілерді жояды, олардың кедергісі металл өткізгіштердің қосылуы кезінде айтарлықтай жоғарылайды. Джорджия штатының технология институты ғалымдарының графендік наноленттердің ені 18 нм және ұзындығы 0,2–1 мкм салыстырмалы кедергісін талдау бойынша жұмыстары бөлме температурасында осы параметр бойынша наноленттер сол өлшемдегі мыс өткізгіштерден ерекшеленбейтінін көрсетті [5, 6]. Графендік наноленттердің параметрлері кішірек ендегі мыс өткізгіштердің меншікті өткізгіштігінің оптимистік бағаларымен салыстырылғандықтан, зерттеушілер графеннің өз сипаттамалары бойынша дәстүрлі өткізуші материалдан асып түседі деп есептейді. Тек меншікті өткізгіштігі бойынша ғана емес, сонымен қатар жеткізгіштердің неғұрлым жоғары қозғалысы, жылу өткізгіштігі, механикалық беріктігі және көрші өткізуші желілер арасындағы аз сыйымдылық байланысы бойынша да. Осының арқасында қажетті сипаттамалары бар нанoeлектронды аспаптарды құру кезінде үлкен икемділікке қол жеткізіледі.

Тегіс графен табақтар ионды-сәулелі литографиямен оңай өңделеді, оларды наноленттерге кесуге болады. Мұнда Пенсильван университетінің мамандары ұсынған графеннің бірнеше қабаты бар парақтарды өңдеу арқылы нанолент алу әдісі, темір нанобөлшектерінің көмегімен белгілі бір кристаллографиялық бағыттар бойынша қызығушылық тудырады.

Ренсселир политехникалық институтының ғалымдары Народж Наяк пен Филипп Шемелдің графеннің қасиеттерін "күйге келтіру" бойынша әр түрлі төсеніштерде өсіру арқылы жұмысы да қызығушылық танытады [7]. Зерттеулер оттегімен өңделген бетке жағу кезінде графен жартылай өткізгіштің қасиетіне ие болатынын, ал сутегімен өңделген бетке жағу кезінде металдың қасиетіне ие болатынын көрсетті.

Осылайша, аралық және белсенді электрондық аспаптарды қалыптастыру үшін графендік наноленттерді пайдалану мүмкіндігі пайда болды. Бұл мүмкіндікті ірі электрондық компаниялар елемеді.

Графендік транзистор

2008 жылдың соңында IBM компаниясы гигагерц диапазонында жұмыс істейтін графикалық далалық транзисторды (GFET) әзірлеу туралы жариялады. Осылайша, DARPA демеуші және АҚШ ғарыш және Әскери-теңіз жүйелері орталығының (Space and Naval Warfare Systems Center, SNWSC) басшылығымен орындалатын жж-қолдануға арналған көміртекті электрониканы құру бағдарламасын (Carbon Electronics for RF Applications, CERA) орындау жолында маңызды қадам жасалды.

Транзистор графит қабыршықтарын механикалық еріту әдісі арқылы ені 20 нм графен нанолента негізінде дайындалған және оларды қалыңдығы 300 нм кремний термиялық оксидінің қабатына орналастыру (>10 кОм·см) (сурет.2). Ағыс пен ағыс электродтары адгезив рөлін атқаратын 1 нм қалыңдығы титан қабатының үстіне жағылатын Pd/Au қабаттары 10 нм/50 нм қызмет етті. Желімдеу оқшаулағышына қалыңдығы 12 нм алюминий оксидінің пленкасы, атомдық-қабатты эпитаксия әдісімен (Atomic Layer Deposition, ALD) 250°C температурада тұндырылған. Электродтар электронды-сәулелі литография және жару арқылы қалыптасты. Электродтар бастауынан басылғанда, бүкіл графеновую чешуйку (сур.2Б) транзистордың S-параметрлерін өлшеу үшін оны алу кезінде белгісіздікті азайту үшін. Электродтар арасындағы қашықтық 500 нм болды, LG ұзындығының жоғарғы қақпағы бұл қашықтықты толығымен жабмаған. Қақпақтың ені (немесе екі арнаның ені) ~40 мкм құрады.

Аспаптың түпкілікті параметрлеріне әсер ететін проблемаларды анықтау үшін әрбір технологиялық операциядан кейін тұрақты ток бойынша транзистордың электрлік сипаттамалары өлшенді. Meff бекітпесінің диэлектрик шөгіндісіне дейін тасушылардың қозғалуы $400 \text{ см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$ құрады, диэлектрик шөгіндісінен кейін μ_{eff} айтарлықтай азайды.

IBM компаниясы жасаған графенді далалық транзисторларда заряд кернеудің оң және теріс мәндерінде электрондар мен тесіктер тасымалданады. Ең аз өткізгіштік зарядты тасымалдауға электрондар мен тесіктердің салымы одинак нүктесіне сәйкес келеді. Транзистордың жоғарғы бекітпесінің кернеуі ең төменгі өткізгіштіктің мәніне немесе жоғарғы бекітпенің электродтарының металдануы графеналық арнаның қасиеттерін өзгертпейтінін көрсетіп, токтың аз әсер етеді. Жоғары бекітпелері бар далалық транзисторларда ағыс тогының $ID(VD)$ кернеуінен 1,6 В кернеуіне дейінгі сызықтық тәуелділігі анықталды. Графенді транзисторларда токтың қанығуы ығысу кернеуінің жоғары мәндерінде мүмкін. Бірақ қажетті қанығу жылдамдығына қол жеткізу үшін ағыс кернеуінің мәнін көрсететін кезде тасымалдаушылардың қозғалысы неғұрлым жоғары болуы тиіс.

Жоғары электродтармен және әртүрлі ұзындықтағы жапқыштармен графенді транзисторлардың жоғары жиілікті сипаттамаларын өлшеу қысқа тұйықталу режиміндегі Ток бойынша күшейткіштің өте жақсы жиілікті тәуелділігін көрсетті, бұл дәстүрлі далалық транзистордың ұқсас екенін көрсетеді. Алынды, бұл өзгеруіне кернеу тиек жиілігі қималар fT пропорционал құламасы сипаттамалары тікелей тарату gm сәйкес білдіру $fT = gm / (2\pi CG)$, онда CG - жалпы сыйымдылығы бекітпенің. $Ft \sim 1/LG^2$ тәуелділігіне сәйкес Арна

ұзындығының азаюымен кесу жиілігі ұлғайған және 150 нм графендік далалық транзистор арнасының ұзындығы кезінде 26 ГГц құрады. Әзірлеушілердің пікірі бойынша, графен тасығыштарының жоғары қозғалғыштығын дайындау процесінде қамтамасыз ету кезінде (шамамен 2000 см²/В·с) ысырманың ұзындығы 50 нм кезінде кесу жиілігі терагерц (1012 Гц) деңгейіне жетуі мүмкін.

Одан әрі кремний карбидінің пластиналарында графенді өсіру және графенді нанолентті транзистор каналының енін 2 нм дейін азайту жоспарлануда [9-11].

Высокочастотный графеновый полевой транзистор продемонстрирован ООО HRL Laboratories (США) [12]. Работа выполнена в рамках программы CERA в сотрудничестве с группой университетов, промышленных компаний и Исследовательской лаборатории ВМС (NRL). Ток во включенном состоянии составлял 1180 мкА/мкм при напряжении стока 1 В. Частота отсечки была равна 4 ГГц при длине затвора 2 мкм. Жоғары жиілікті графендік далалық транзистор HRL Laboratories (АҚШ) ЖШҚ көрсетті. Жұмыс Cera бағдарламасы аясында университеттер, өнеркәсіптік компаниялар тобымен және ӘТК зерттеу зертханасымен (NRL) ынтымақтастықта орындалды. Қосылған күйдегі Ток ағыс кернеуі 1 В. кезінде 1180 мкка/мкм құрады. 14 ГГц ең жоғарғы жиілігі 5 В ағын көзі кернеуінде тіркелді. Мысалы, жиіліктік сипаттамаларды жақсартуға болады, өйткені графенді далалық транзисторлар 100 нм кем жапқыш ұзындығына дейін масштабталуы мүмкін, бұл паразиттік сыйымдылық пен кедергінің азаюына әкеледі. CERA бағдарламасы 2008 жылдың шілде айында басталды, оның аяқталуы 2012 жылдың қыркүйек айына жоспарланып отыр. Бағдарламаның мақсаты-графенді транзисторлар негізінде W-диапазонында жұмыс істейтін аз шуыл күшейткіштерді құру (>90 ГГц). Күшейткіштерді диаметрі 200 мм немесе одан астам пластиналарда 90% - дан асатын жарамды шығымы бар дайындау жоспарланып отыр. Келесі буындағы ақпаратты бейнелеудің әскери құралдарына және кеңжолақты байланыс жүйелеріне арналған күшейткіштер арналған [12-14].

Шамасы, жиіліктік сипаттамаларды жақсартуға болады, өйткені графенді далалық транзисторлар жапқыш ұзындығына дейін 100 нм кем масштабталуы мүмкін, бұл паразиттік сыйымдылық және кедергі мәндерінің азаюына әкеледі. CERA бағдарламасы 2008 жылдың шілде айында басталды, оның аяқталуы 2012 жылдың қыркүйек айына жоспарланып отыр. Бағдарламаның мақсаты-графенді транзисторлар негізінде W-диапазонында жұмыс істейтін аз шуыл күшейткіштерді құру (>90 ГГц). Күшейткіштерді диаметрі 200 мм немесе одан астам пластиналарда 90% - дан асатын жарамды шығымы бар дайындау жоспарланып отыр. Келесі буындағы ақпаратты бейнелеудің әскери құралдарына және кеңжолақты байланыс жүйелеріне арналған күшейткіштер арналған [12-14].

Оңтайлы сипаттамалары бар материалды синтездеу және өндеудің технологиялық процестерін жетілдіру бойынша жұмыстар вольт-амперлік сипаттаманың тамаша қанығуы және қосу тогының ажырату тогына қатынасы бар ~6000 см²/В·с тасығыштардың қозғалғыштығымен эпитаксиалды графенді транзисторларды құруға мүмкіндік берді.

Массачусетс технологиялық институтының ғалымдары әзірлеген бір ретранзисторлы жиілікті көбейту қызығушылық танытады. Схема бір графенді транзистор мен бір жүктеме резисторынан тұрады. Кремнийдегі немесе галлий арсенидіндегі дәстүрлі жартылай өткізгіш аспаптардан айырмашылығы, олардың жұмысы бір типті тасымалдаушыларды (электрондарды немесе тесіктерді) тасымалдауға негізделген, тасушылардың түріне қарамастан графенді транзистордың тогы резистор арқылы бір бағытта өтеді, бұл жиілікті көбейту әсерін қамтамасыз етеді. Оң жартылай период ішінде айнымалы кіріс сигналын берген кезде ағын арқылы электрондар тогы индукцияланады. Теріс жартылай период ішінде тесік тогы индукцияланады. Шығыс кернеуі кіріс айнымалы сигналының өзгеруіне сәйкес нөлдік мәннен өседі, бұл жиіліктің екі еселенуіне әкеледі.

Графендік жады

Графеннің ерекше қасиеттері компьютерлік техниканың жоғары өнімді компоненттерін, оның ішінде энергияға тәуелді жедел жадты әзірлеушілерді да тартады. Сонымен қатар, Райс университетінің (АҚШ) ғалымдары Джеймс Тур, Юйбао Ли және

Александр Синицкийдің диэлектрлік наностержнейлер – қалыңдығы 5-10 нм графеналық қабығы бар кремнийдің қос тотығынан жасалған өзегі негізінде жады ұяшығын құрған жұмысына назар аударады. Мұндай стрежнялардың сипаттамаларын зерттеу олардың вольт-амперлік сипаттамасының сызықсыз екенін көрсетті: кернеудің төмен мәндері кезінде токтың күші кернеудің ұлғаюымен монотонды түрде өсуде, бірақ кернеудің кейбір шекті мәні кезінде $V_{пор}$ өткізбейтін жағдайға күрт ауысу жүреді (сурет.4). Сонымен қатар, мұндай құрылым жадқа ие: егер нанодержание өткізгіш емес күйге $v_{пор}$ дан асатын импульспен ауыстырса, бұл жағдай кернеуді түсіргеннен кейін өзгермейді. Өткізгіш күйін қалпына келтіру тек $V < V_{пор}$ кернеуінің кейбір мәнінде ғана мүмкін. Сканерлейтін электронды микроскоптың көмегімен нанодержия құрылымын зерттеу көрсеткендей, шекті кернеуден Жоғары кернеу кезінде ток графеннің ені бірнеше нанометрлердің үзілуіне әкеледі. Аз кернеуді қайта беру кезінде үзілу тұйықталады. Зерттеушілер бұл қасиетті келесідей түсіндірді. $V_{пор}$ дан асатын кернеу кезінде графитті қабық ақаулар орналасқан жерлерде бұзылады. Жарылған графенді қабаттардың бөліктері нанокабельдің бетінде бір-біріне жақын орналасуы мүмкін және аксиалды электр өрісін қолданғанда бір-біріне тартылып, тізбекті тұйықтайды (сурет.6). Осылайша, графендік қабық наноэлектромеханикалық жүйе (НЭМС) принципі бойынша жұмыс істейді, онда графендік парақтардың орын ауыстыруы атомдардың өлшемдерімен салыстырылатын масштабтарда болады. Дегенмен, профессор турдың басшылығымен зерттеушілер тобы графеннің жадының әсері нақты түсіндірілмегенін мойындайды.

Дегенмен, мұндай наноұстағыштар негізінде логикалық "0" және "1" төмен және жоғары өткізгіш күйлерге сәйкес келетін жады ұяшығын жасауға болады. Мұндай ұяшықта ақпаратты оқу, жазу және өшіру тиісті кернеу импульстерімен орындауға болады. Осылайша, графеналық қабығы бар наностержнялардың негізіндегі құрылғы энергияға тәуелді жады ұяшығы болып табылады. Зерттеушілердің мәліметтеріне сәйкес, күйдегі сигналдың қатынасы қосылған ("1") және ажыратылған ("0") 107-ге жетеді.

Әзірлеушілердің айтуынша, графеналық жады көлемі энергияға тәуелді флеш-жадының ең перспективалы көлемінен бес есе асып кетуі мүмкін, өйткені оның жадының ұяшығының көлемі 10 нм-ден аз, ал флеш-жадында ұяшықтың ең аз мөлшері 25 нм-ден кем болмайды. Сонымен қатар, жаңа жад ұяшығы қазіргі заманғы жад құрылғыларында сияқты үш Контакт емес, екі Контакт болуы мүмкін, бұл графен матрицаларын қабат-қабат өсіруге және тиісінше, әр қабатпен жад көлемін арттыруға мүмкіндік береді. Ұсынылған жадты сынау, сондай-ақ оның радиациялық сәулеленуге төзімділігін көрсетті, бұл оны экстремалды жағдайларда жұмыс істейтін жүйелерде қолдану үшін перспективалы етеді.

Сонымен қатар, сынақтар графеналық жадтың жоғары сенімділігін көрсетті – 20 мың жазу/оқу циклы өлшенген мәні 1 мкс құрайтын ұяшықты ауыстырып қосу жылдамдығының өзгеруіне әкеп соқпады. Сондықтан, графеналық 3У өткізу қабілеті жоғары болуы мүмкін.

Ұсынылған графеналық жадтың кемшіліктеріне іріктеудің үлкен уақыты жатады-100 нс (қазіргі заманғы созуға қарағанда он есе көп). Бірақ әзірлеушілер жаңа құрылымның жетілуіне қарай олар осы уақытты азайтатынына сенімді.

Қазіргі таңда Тур профессорының тобы графеналық жадыны қалыптастырудың өнеркәсіптік технологиясын қарқынды түрде әзірлейді, оның нұсқаларының бірі-графеннің бу фазасынан кремний немесе өзге де төсекке химиялық шөгуді және графеннің нанополосын қалыптастыру үшін кәдімгі немесе электронды-сәулелі фотолитографияны қолдану болып табылады.

Тур тобы Nuga (New Programmable Gate Arrays) компаниясымен келісім жасады, оған сәйкес графенді нанополос құру технологиясы графенді вентильді матрицаның микросхемаларының тесіктеріне қосу үшін пайдаланылатын болады. Графинге берілетін кернеуді 3,5-тен 3 В-ға дейін өзгерте отырып, графен түзілетін қосылымды "ажыратуға" және "тұйықтауға" болады және осылайша вентильді матрицаны бағдарламалауға және бағдарламауға болады. 1 В кернеуді беру қосылыстың күйін анықтауға мүмкіндік береді [16-18].

Тур тобы сондай-ақ ағынды басып шығару әдісімен радиожилікті Сәйкестендіру (RFID) құрылғыларын дайындау жабдықтарында қолдану үшін графеннің жұқа пленкалы өткізуші парақтарын алу процесін лицензиялады.

Графен лентасының үстіне сегнетоэлектриктің жұқа қабатын келтірген Барборос Озилмаздың басшылығымен Сингапур Ұлттық университеті ғалымдарының жұмысы да қызығушылық тудырады. Сегнетоэлектриктің қабатына кернеу беру оның өз магнит өрісінің бағытын өзгертуге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде графен кедергісін өзгертеді. Бұл түрдегі жады жасау өте оңай. Сонымен қатар, ферроэлектриктердің қасиеттері жақсы зерттелген, демек, жад ұяшығының жағдайын ауыстыратын басқарушы қабатпен проблемалар туындамауы тиіс. Рас, мұндай типтегі графеналық жады жасау жобасы ерте сатыда. Қазір зерттеушілер көлемі 2 мкм болатын графен табақтарын кремний төсенішіне апарды, содан кейін екі алтын электрод тұндырады, содан кейін сегнетоэлектриктің жоғарғы қабатын жағады. Мұндай қатты құрылғының деректерін оқу жылдамдығы магниттік жадқа қарағанда бес есе жоғары. Жаңа құрылғылар күйден 100 мыңға жуық ауысу цикліне төтеп бере алады ("1") қосулы ("0") күйіне. Салыстыру үшін-қазіргі заманғы магниттік жады 106-дан астам жазба/қайта жазу цикліне шыдайды.

Графеннен графанға дейін

Міне, тағы да чемпионат Манчестер университетінің ғалымдары, соның ішінде А.Гейм және К.Нососелов, олар графеннің басқа заттармен әрекеттесетінін, нәтижесінде әртүрлі қасиеттері бар жаңа қосылыстар пайда болатындығын анықтады [19]. Олар тағы да алғаш рет жоғары электр өткізгіштігі бар материалды графеннің бақыланатын конверсиялану мүмкіндігі, оны сутегі ағынымен диэлектрик - графанға айналдыру арқылы көрсетті.

Айта кету керек, «графан» термині алғаш рет 2006 жылы Пенсильвания университетінің физиктерімен енгізілген, ол графеннің атом сутегімен әрекеттесуі нәтижесінде СН химиялық формуласымен жаңа зат пайда бола алатындығын теория жүзінде көрсетті. Профессор Джордж Софаның басшылығымен жұмыс істеген теоретиктер жаңа материалдың жолақ құрылымын есептеді, графан жартылай өткізгіш болуы керек деп болжады және оны дайындау әдістері мен электроникада қолданылуы мүмкін деп қарастырды. Ал қазір болжамдалған материал іс жүзінде орындалуда, теоретиктердің есептері расталды.

Графан, графен сияқты, екі өлшемді алтыбұрышты кристалды құрылымға ие. Бұл жағдайда сутегі атомдары көміртегі жазықтығының екі жағындағы атомдарға жалғанады (7-сурет). Қалыптастырудың дәстүрлі әдісі бойынша алынған және аргон атмосферасында 300 ° С температурада тазартылған графен (мүмкін қоспалар мен қоспалардың бастапқы материалының кристалдарынан арылу үшін) екі сағат бойы аргон мен молекулалық сутектің қоспасынан түзілген плазмада ұшырады (H₂ үлесі 10%). төмен қысымда (~ 10 Р).

Графанның өткізгіштігін өлшеу оның жартылай өткізгіш қасиеттерінің теориялық болжамдарын растады. Температураның жоғарылауымен жартылай өткізгіштер сияқты графанның кедергісі төмендеді. Сұйық гелий температурасында (~ 4К) графеннің кедергісі екі ретті ұлғаяды, ал тасымалдаушылардың қозғалғыштығы графенмен салыстырғанда 1000 есе төмендеді. Графанды 24 сағат бойы 450 ° С температурада тазартқаннан кейін ол қайтадан графенге айналады, оның қарсыласуы тек температураға байланысты, ал тасымалдаушылардың қозғалғыштығы іс жүзінде бірдей болады.

Графанның пайда болуымен тікелей жаңа материал парағында наноэлектронды схемалардың баспа схемаларын құрудың жаңа мүмкіндіктері ашылды, содан кейін лазердің көмегімен қажетті жерлерде сутекті буландыру арқылы байланыс түйіндері пайда болды.

Сонымен қатар, жаңа материал сутегі энергиясында қолданылуы мүмкін. Мұнда басты рөлді графенді қыздырған кезде атом сутегін шығару болады. Қазіргі заманғы сутегі энергиясының басты мәселелерінің бірі - сутекті сақтаудың тиімді жолдарын іздеу. Графанның «отынды» байланған күйде сақтау мүмкіндігі бұл мәселені шешуде өте перспективалы болып табылады.

Графен дайындау графен модификациясын әрі қарай зерттеуге кең мүмкіндіктер ашады. Бір жағынан металл графен және екінші жағынан жартылай өткізгіштің немесе диэлектриктің қасиеттері бар графен болса, олардың арасындағы белгісіз кеңістікті толтыруға тырысуға болады. Нәліктен, мысалы, сутектің орнына графен мен фтордың өзара әрекеттесуін қарастырмасқа?

Графенмен және оның туындыларымен жүргізілген тәжірибелер тәжірибеде жартылай өткізгіш пен диэлектриктің кез-келген түрін өндірудің орынды екенін дәлелдеді. Жақында бәрі креонды жаңа буын наноэлектроникада алмастыратын графен болатындығын және болашақта кванттық электрониканың негізіне айналатындығын айтады. Зертханада жаңа технологияны сәтті көрсеткен сәттен бастап, оның нарықта пайда болуына дейін, Intel мәліметтері бойынша кемінде сегіз жыл өтеді. Бұл ұзақ емес.

Қолданылған әдебиеттер тізімі

1. Novoselov K. S. et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films.– Science, 2004.
2. Freitag M. Nanoelectronics goes flat out.– Nature nanotechnology, Aug. 2008, p.455–457.
3. Wang Z.F. et al. Emerging Nanocircuit Paradigm: Graphene-based Electronics for Nanoscale Computing. – IEEE International Symposium on Nanoscale Architecture (NANOARCH 2007), p.93–100.
5. Tunable Graphene Bandgap Opens the Way to Nanoelectronics and Nanophotonics.– ScienceDaily, June 15, 2009. <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/06/090610133453.htm>
Nature, June 11, 2009.
6. Two-Dimensional Graphene Nanoribbons.– J. Am. Chem. Soc., 2008, 130 (13), p.4216–4217.
7. Research into Graphene Nanoribbons Provides New Reasons for Using it as Interconnects In Future Computer Chips. – <http://www.azonano.com/news.asp?newsID=12873>.
8. Shemella P., Zhang Y. et al. Energy Gaps in Zero-Dimensional Graphene Nanoribbons.— Appl. Phys. Lett. July 23, 2007.
9. Shemella P. and Nayak S. K. Electronic Structure and Band-Gap Modulation of Graphene via Substrate Surface Chemistry.– Appl. Phys. Lett., 2007, Jan.20, 91, 042101; doi:10.1063/1.2761531.
10. IBM reports records 26GHz cut-off frequency for graphene FET. –Semiconductor today, Feb. 2009, mol.4, Issue 1.
11. Deffree S. IBM claims graphene field-effect transistors at GHz frequencies. – Electronic News, 12/19/2008.
12. Johnson R.C. IBM fabs grapheme FETs. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=202103726
13. Lin Y-M et al. Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies. –Nano Letters, 2009, v.9, No.1, p.422–426.
14. HRL demos first RF graphene FETs. www.semiconductor-today.com/news_items/2008/DEC/HRL_051208.htm
15. IQE works with CERA program to develop graphene carbon-based RF technology. www.semiconductor-today.com/news_items/2008/SEPT/IQE_230908.htm
16. HRL Laboratories Announces Another Breakthrough in Advancing Graphene Transistor Technology. –www.hrl.com/assets/pressreleases/2009/prsRls_090521.html
17. Johnson R.C. Graphene circuit combines Si, GaAs functions. www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=216200559.
18. Miller M. Future nonvolatile memories may have carbon footprints. EDN, 1/8/2009.
19. Next generation nanotechnology computer memory made of graphene. www.nanowerk.com/spotlight/spotid=8363

20. Williams M. Graphite's good tidings.
www.media.rice.edu/media/NewsBot.asp?MODE=VIEW&ID=13024&SnID=344324078.

-b