

В. Гусинін, В. Локтєв, С. Шарапов

## ГРАФЕН: НЕЙМОВІРНЕ СТАЛО МОЖЛИВИМ

*Цьогорічну Нобелівську премію в галузі фізики присуджено вихідцям із колишнього СРСР Андре Геймові (Andre Geim) і Костянтину Новосьолову (Konstantin Novoselov) за проривні експерименти з новоствореним двовимірним матеріалом — графеном. Це 108-е присудження фізикам найпрестижнішої у світі наукової нагороди.*

Випускники Московського фізико-технічного інституту (МФТІ) Андре Гейм і Костянтин Новосьолов, які тепер працюють в університеті Манчестера (Велика Британія), зробили вирішальний внесок в отримання, ідентифікацію, з'ясування основних фізичних характеристик нового матеріалу, що отримав назву графен [1]. Цей, створений тільки шість років тому, матеріал буває лише одношаровим (а точніше — товщиною в один атом) вуглецевим кристалом, структура якого має гексагональну, або стільникову, ґратку. Отримання двовимірної кристалічної системи викликало неабиякий ажіотаж у науковому світі, бо вважали, що існування подібних систем неможливе у принципі. Проте головним виявилось навіть не стільки саме відкриття нового матеріалу,<sup>1</sup> скільки швидкість установлення того, що він не просто являє окремий фізичний об'єкт, а має цілу низку виняткових властивостей, які роблять його надзвичайно цікавим і для фундаменталь-

<sup>1</sup> Необхідно зауважити, що графеноподібні структури, як і сам термін «графен», відомі ще з 60-х років, коли його згадували тільки в хімічних роботах без будь-яких свідчень про екстраординарність.



Андре Гейм



Костянтин Новосьолов

них досліджень, і для подальшого широкого застосування.

Серед найбільш уражаючих властивостей графену можна, насамперед, відзначити, що він найміцніший серед відомих кристалічних речовин, його теплопровідність на порядок вища, ніж теплопровідність міді, а електрони у графені чутливіші до прикладеного електричного поля за всі відомі напівпровідники. Причому — і це теж важливо — його електронні властивості мають глибокі аналогії з фізикою елементарних частинок і квантовою теорією поля, бо електрони у графені завдяки вза-

© ГУСИНІН Валерій Павлович. Доктор фіз.-мат. наук. Завідувач відділу Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

ЛОКТЄВ Вадим Михайлович. Академік НАН України. Академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України.

ШАРАПОВ Сергій Геннадійович. Доктор фіз.-мат. наук. Провідний науковий співробітник Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (Київ). 2010.

ємодії з кристалічною ґраткою поведуться як безмасові частинки, стаючи дещо подібними до таких частинок, як нейтрино, чи навіть квантів світла — фотонів.

#### WHO IS WHO?

**А**ндре Гейм (Андрій Костянтинович Гейм) народився у Сочі в 1958 р. у родині інженерів німецького походження. Нині він громадянин Нідерландів. У 1976–1982 рр. А. Гейм навчався в МФТІ, після закінчення якого працював в Інституті фізики твердого тіла РАН у Черноголовці, де 1987 р. отримав ступінь кандидата фізико-математичних наук. Звідти переїхав до Європи і почав працювати дослідником у Нотінгемському університеті (Англія), університеті Бат (Англія), Копенгагенському університеті, а згодом — професором Радбурзького університету міста Наймегена в Нідерландах. З 2001 р. він обіймає дуже престижну посаду професора Ленгворсі в Манчестерському університеті. Цю професорську позицію з експериментальної фізики заснував ще в 1874 р. Е.Р. Ленгворсі (E.R. Langworthy), який задля збереження цієї посади в університеті та її фінансування заповів нащадкам велику на той час суму в 10 тис. фунтів. Символічно, що попередниками А. Гейма на цій посаді були такі видатні фізики, як нобелівські лауреати Ернст Резерфорд (Ernest Rutherford — премія з хімії 1908 р.), Лоуренс Брегг (Lawrence Bragg — премія з фізики 1915 р.), Патрік Блекетт (Patrick Blackett — премія з фізики 1948 р.).

З 2002 р. А. Гейм — директор Центру мезонауки і нанотехнологій при Манчестерському університеті. Серед багатьох серйозних, престижних міжнародних нагород і відзнак А. Гейма варто згадати одну — так звану Шнобелівську премію (Ig Nobel Prize — від латинського слова *ignoble* «неблагородний»). Її він розділив 2000 р. з од-

ним з найвідоміших матфізиків сьогодення Майклом Беррі (Michael Berry) із Бристольського університету (Англія) за наочну демонстрацію великої сили, що може діяти на немагнітні речовини, наприкладі живої істоти — дослідження діамантної левітації жабеняти.

Другий лауреат, Костянтин Сергійович Новосолов, народився в 1974 р. у Нижньому Тагілі, зараз має російське і британське громадянства. У 1991 р. після закінчення нижньотагільського лицю також уступив до МФТІ, який закінчив 1997 р. Два роки потому працював в Інституті проблем технології мікроелектроніки РАН (Черноголовка). У 1999 р. К. Новосолов переїздить до Нідерландів, де стає аспірантом А. Гейма в університеті Наймегена, а в 2001 р. вони вдвох починають працювати в Манчестерському університеті. PhD ступінь К. Новосолов отримав у 2004 р. в лабораторії сильних магнітних полів університету Наймегена, дослідивши рух доменної стінки, яка переповзає через точковий дефект у наномагнетику. Як бачимо, його дисертація не мала нічого спільного з майбутнім пошуком максимально тонких фізичних середовищ. У 2008 р. К. Новосолов разом з А. Геймом отримав премію «Єврофізика» за відкриття графену і вимірювання його фізичних властивостей.

#### ОТРИМАННЯ ГРАФЕНУ

**В**ажко уявити, але серйозне досягнення у фізиці було зроблено простим і навіть дотепним методом — прямим застосуванням звичайнісінького скотчу. В 2004 р. К. Новосолов і А. Гейм з колегами саме за допомогою цієї липкої стрічки зробили відкриття, що суттєво вплинуло на ситуацію у фізиці конденсованого стану [2]. Почавши працювати з графітовими зразками завтовшки близько 1 мм і добре знаючи про слабку міжшарову взаємодію в графіті, вони поставили за мету отримати якомога

тонші графітові шари. Для цього зразки приклеювали до звичайного скотчу і від них механічно відривали ще тонші пласти, які в певній кількості утворювались на ньому. Потім скотч обережно видаляли з налипшими тонкими фрагментами графіту, які, зрозуміло, були різношарові. Після кількох повторень цієї операції окремі шари графіту виявлялись настільки тонкими, що вміщували всього кілька атомних шарів, а інколи — один, і це була справжня несподіванка.

Одержані плівкові шматочки зі скінченням і достатньо малим числом шарів і були бажаними зразками графену, які тепер так і називають *одно-, дво-, тришарові* і т.д. графенові плівки. Для подальшого дослідження — зокрема встановлення істинної товщини, їх розміщали на підкладці з кремнію, верхній шар якої був ізолятором з оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ . Товсті плівки з графіту (товщиною більше 3 нм і розміром понад 100 мк) видно навіть неозброєним оком (фактично це слід на папері від олівця), а справжній графен, розмір плівки якого не перевищує 10 мк, можна побачити лише за допомогою оптичного мікроскопа. Більше того, через явище інтерференції світла спостереження графену залежить не лише від його товщини, а й від товщини верхнього ізоляційного шару підкладки. Як з'ясували пізніше, саме те, що товщина шару з оксиду кремнію дорівнювала приблизно 300 нм, виявилось неабиякою знахідкою, бо якраз така товщина найсприятливіша з точки зору оптичних спостережень.

Для електричних вимірювань цього, звичайно, замало, і до отриманих графенових плівочок довжиною кілька мк треба було підвести металеві контакти, тобто використати електронно-променеву літографію чи добре розроблену і широко застосовувану для виробництва напівпровідникових мікросхем методику. Проте мали місце і певні експериментальні труднощі, бо в даному

випадкові йшлося про невідомі для літографії плівкові зразки, товщина яких робила їх квантовими об'єктами.

Можна припустити, що, приступаючи до виконання описаних процедур, А. Гейм і К. Новосолов свідомо чи несвідомо йшли проти основоположних висновків таких усесвітньо відомих авторитетів, як теоретики Лев Ландау і Рудольф Пайерлс (Rudolf Peierls), котрі математично довели, що двовимірні кристали не можуть бути термодинамічно стабільними, що, у свою чергу, повністю заперечує їхнє існування. Таке твердження кілька десятиліть уважали непорушним. І справді, нескладний розрахунок, наведений у багатьох підручниках, переконливо демонструє, що теплові флуктуації кристалічної ґратки швидко призводять до таких зміщень атомів з положень рівноваги, які за величиною збіжні з міжатомною відстанню у вихідній ґратці. Між тим графен, отриманий, нехай і дещо кустарно, з експериментальною вишуканістю гідною наслідування, існував як суто двовимірне фізичне середовище, а отже, перед фахівцями постало питання — чому?

Як з'ясовано згодом, вільний графен, будучи в цілому дійсно плоским, має трохи нерівну, «зім'яту», поверхню. Тобто атоми не лежать в одній площині, а виходять з неї на невеликій відстані, залишаючись при цьому дуже сильно зв'язаними між собою саме у просторі площини. Поверхня графену вкрита, образно кажучи, випадково розташованими пагорбами і долинами, які отримали назву *rippliv* (ripples). Якщо строго, то останні, будучи наслідками спонтанних зміщень атомів вуглецю в *третьій* вимір, створюють ефективну «товщину» одноатомних шарів, яка, у свою чергу, породжує їхню поперечну відносно площини механічну жорсткість, чим дозволяє уникнути обмеження Ландау–Пайерлса. Водночас, і це яскраво довели численні експерименти, одношаровий графен, незважаючи

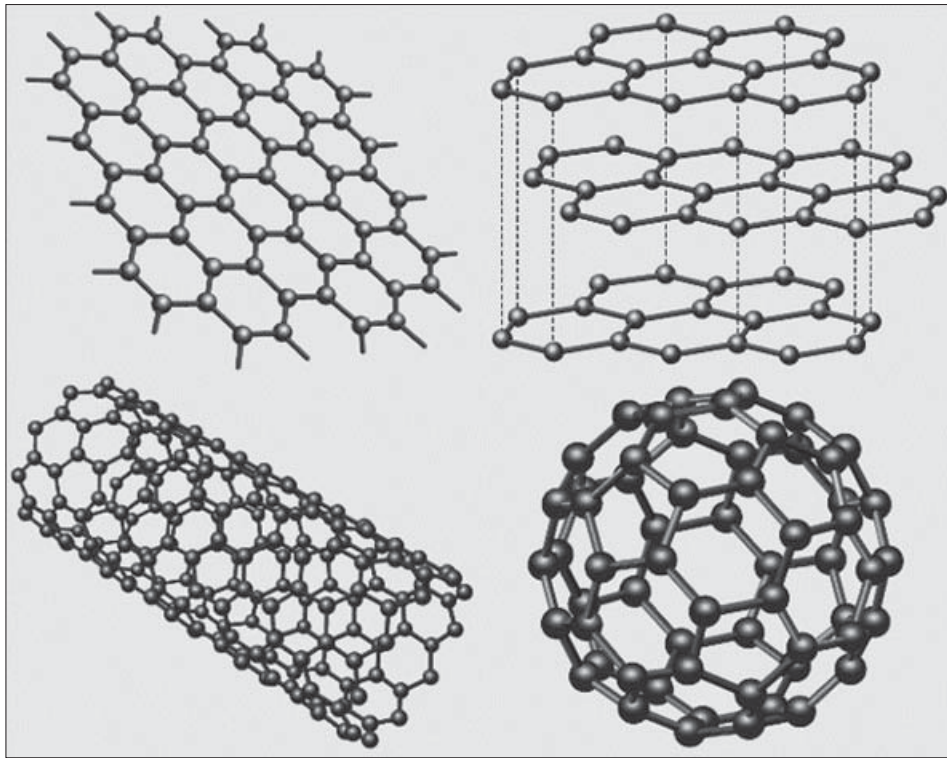


Рис. 1. Графен, графіт, вуглецева нанотрубка, фулерен [3]

на згадану тривимірність, у багатьох (точніше — майже всіх проявах) поводить ся як двовимірний кристал.

З теоретичної точки зору одношарова стільникова структура графену, яка справді відповідає бджолиним стільникам, робить його «прабатьком» майже всіх сполук, що базуються на вуглеці та мають хімічні зв'язки, близькі до  $sp^2$  (див. рис. 1): графіт — це фактично стос великої кількості шарів графену; вуглецеві нанотрубки утворені зі згорнутих у рулони різного діаметра одного чи кількох шарів графену; фулерени, чи «бакіболи», — ні що інше, як нанорозмірні сфероподібні молекули, поверхня яких також фактично складається із графенових площин. Ці алотропні форми вуглецю вивчені та знайдені набагато раніше за графен. Вони вже мають багато застосувань, але всі їхні електричні, магнітні, механічні властивості походять, як тепер довели, з

відповідних властивостей графену<sup>2</sup>. Унікальні механічні властивості графену (а саме його неперевершену міцність) яскраво й переконливо ілюструє гіпотетичний приклад з рис. 2.

Крім електронних властивостей графену, які визначають водночас і його оптичні властивості, відзначимо, що зображений на рис. 2 гамак був би невидимий, оскільки графен поглинає лише 2,3% упалоного світла незалежно від довжини світлової хвилі.

#### ЕЛЕКТРОННА ФІЗИКА ГРАФЕНУ

Більшість унікальних властивостей графену виникає, як зазначали, з поведінки в ньому електронів. У цьому випадку їх-

<sup>2</sup> Питання, кого вважати «батьками», а кого «дітьми», не таке вже і тривіальне, як здається, оскільки в 2009 р. інші дослідники показали, що графенові нанострічки можна отримувати шляхом розрізання нанотрубок уздовж осі.

ній рух у стільниковій ґратці, що має два нееквівалентні атоми в елементарній комірці, призводить до появи у кристалі двох зон<sup>3</sup>:  $\pi$  і  $\pi^*$  — валентна зона і зона провідності (див. рис. 3).

Ці зони заповнюють вільні  $\pi$ -електрони, які, за принципом Паулі, повинні відрізнятися величиною хвильового вектора  $\mathbf{k}$  і двома значеннями проекції спіну. Кількість станів у кожній зоні дорівнює кількості електронів, тож валентна зона заповнена цілком, тоді як зона провідності залишається пустою. Рівень Фермі  $\varepsilon_F$ , як видно з рис. 3, розташовано в точках  $\mathbf{K}$ , що отримали назву *діраківських*, шести подвійних конусів. Закон дисперсії  $\varepsilon(\mathbf{k})$  в околі цих точок, або залежність енергії квазічастинкових збуджень від хвильового вектора  $\mathbf{k}$ , у графені виявляється лінійним:  $\varepsilon(\mathbf{k}) = \hbar v_F |\mathbf{k}|$ , де нахил діраківських конусів задає швидкість Фермі  $v_F$  ( $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  — стала Планка).

Завдяки лінійній дисперсії густина станів у діраківських точках також дорівнює нулеві, а отже, провідність  $\sigma$  ідеального графену дуже низька, порядку кванта провідності  $e^2/h$  ( $e$  — заряд електрона). Дивує не стільки мала величина провідності, скільки її та, звичайно, опору  $R = \sigma^{-1}$  скінченні значення.

Уперше лінійний характер дисперсії електронів у графені встановив у 1947 р. канадський теоретик Філіп Рассел Воллес (Philip Russell Wallace). Проте в ті часи

<sup>3</sup> Якщо бути історично коректним, то можна стверджувати, що структура графену становить окремий вельми простий випадок молекулярних кристалів з кількома молекулами в комірці, ще в 40-ві рр. XX ст. всебічно вивченими українськими фізиками — експериментатором А.Ф. Прихотько і теоретиком О.С. Давидовим, а виниклі у графені енергетичні зони, з погляду загальної теорії молекулярних кристалів, розсунуті на величину давидовського розщеплення. У сходженні найближчих сусідів такі зони на межі зони Бріллюена, де  $\mathbf{k} = \mathbf{K}$ , завжди змикаються.

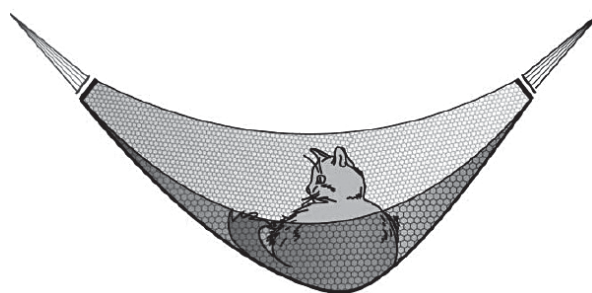


Рис. 2. Гамак з одношарового графену площею  $1 \text{ м}^2$ , масою менший за  $1 \text{ мг}$  може витримати кота вагою  $4 \text{ кг}$ . Якби вдалося зробити подібний одношаровий гамак з найміцнішої сталі, він витримав би вагу лише в  $40 \text{ г}$  [1]

ніхто не сумнівався, що впорядковане конденсоване середовище завтовшки в один атомний шар не може існувати, тому Воллес розглядав стільникову площину як вихідну модель для вивчення електронних властивостей графіту, які були суттєвим складником актуальних досліджень ядерних реакторів, де як уповільнювач використовували саме цей матеріал. Набагато пізніше, лише в 1984 р., тобто рівно за 20 років до фактичного отримання графену, інший канадський теоретик Гордон Семеновф (Gordon Semenoff) довів, що його електронний спектр, або спектр двовимірної стільникової ґратки, має конусоподібний вигляд і добре описується за допомогою рівняння Дірака. Як неважко здогадатися, швидкість світла  $c$ , яка входить у це рівняння, слід замінити на швидкість  $v_F$ . Такий результат впливав безпосередньо з розрахунків, які не викликали заперечень, але спирались на модель невзаємодійних електронів. Вона не була наперед очевидною, а крім того, не виключено, що, скажімо, міжелектронна взаємодія могла змінити спектр, породивши в ньому щілину, що, іншою мовою, відповідає появі маси квазічастинок. Тож перед творцями графену постала експериментальна проблема — перевірити, якими є електрони у графені,

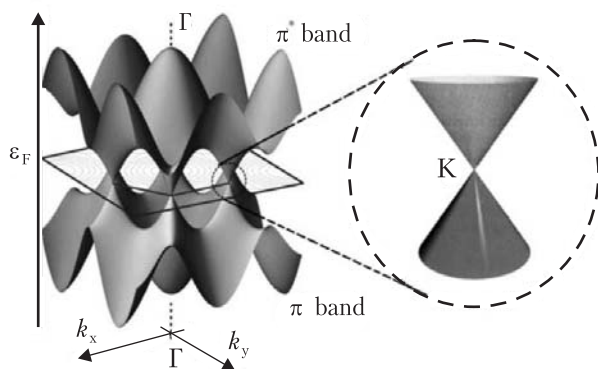


Рис. 3. Зонна структура графену і формування конуса Дірака. Показано напрями хвильового вектора  $\mathbf{k}$  у площині, положення рівня Фермі  $\varepsilon_F$  в точках  $\mathbf{K}$  перетину, або змикання зон [4]

що зводилось до знаходження відповідей на питання:

- чи дійсно вони безмасові, а їхній рух описує рівняння Дірака;
- чи справді, незважаючи на передбачення, рух квазічастинок у графені, як у більшості твердих тіл, описує нерелятивістська квантова механіка.

Саме це змогли незалежно встановити А. Гейм з К. Новосьоловим та їхні співавтори [5], а також група Філіпа Кіма (Philip Kim) з університету Колумбії (США), що теж експериментувала з одношаровим графеном [6]. Пропускаючи електричний струм через графенові стрічки, експериментатори беззаперечно встановили, що здатність вільних електронів до руху (так звана *рухливість* носіїв) набагато (майже на два порядки) перевищує таку здатність у найбільш використовуваних в електроніці кремнієвих напівпровідників.

Ще одна перевага графену і приладів, які вже створюють і створюватимуть на його основі, до чого причетні А. Гейм і К. Новосьолов, у тому, що положенням рівня Фермі в ньому дуже зручно керувати зовнішньою електричною напругою, прикладеною до підкладки з напівпровідника, на якій лежить графеновий зразок

(польовий транзисторний ефект). Цим легко інжектувати у графен носії необхідного знаку.

Проте навіть цих, безперечно, цікавих і важливих результатів, які відкривали певні перспективи для зародження вуглецевої наноелектроніки, було замало для з'ясування одного з ключових питань — яким же врешті-решт рівнянням описати рух електронів у графені. Відповідь на нього знайшли, коли до графенових зразків разом з електричним приклали ще одне зовнішнє поле — магнітне, яке закручувало рух електронів.

### ЕФЕКТ ХОЛЛА У ГРАФЕНІ

Йдеться фактично про вивчення у графені ефекту Холла, який, як відомо, створює додаткові можливості для вимірювання фізичних характеристик квазічастинок. Зокрема, інформацію про властивості електронів можна діставати, вивчаючи залежність електричного опору  $R$  від магнітного поля  $\mathbf{H}$  (чи магнітної індукції  $\mathbf{B}$ ) або, у випадку графену, від густини додаткових електронів/дірок.

У результаті проведених детальних експериментів головною ознакою різниці між графеном і звичайними напівпровідниками стала незвичайна картина ефекту Холла у графені. Нагадаємо, що класичний ефект Холла, відкритий у 1879 р., полягає в тому, що струм, який тече у провіднику в присутності перпендикулярного до напрямку струму магнітного поля, приводить до появи напруги поздовж напрямку, перпендикулярного до напрямків струму і поля (рис. 4). Відношення цієї напруги до струму в цьому ж напрямку зветься опором Холла  $R_H$ . Більше ніж через століття німецький експериментатор Клаус фон Клітцинг (Klaus von Klitzing — Нобелівська премія з фізики 1985 р.) встановив, що в напівпровідникові за температур, близьких до абсолютного нуля, холлів-

ський опір стає квантованим, приймаючи значення  $R_H = h/ve^2 =$  (де  $v$  – додатне ціле число, або так званий *фактор заповнення*).

У той час, коли групи Гейма–Новосьолова і Ф. Кіма досліджували КЕХ у графені, двоє авторів (В.Г. і С.Ш.) цієї статті, спираючись на дослідження Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України з так званого ефекту магнітного каталізу в квантовій теорії поля, вивчали холлівську провідність саме графену. З їхніх розрахунків виходило, що для діраківських електронів у графені на відміну від звичайних факторів заповнення має бути не довільним цілим, а тільки *подвоєним непарним*, тобто  $v = 2(2n + 1)$  або 2, 6, 10, ..., де  $n = 0, 1, 2, \dots$  [7]. Це пов'язано з тим, що послідовність дискретних у зовнішньому магнітному полі рівнів енергії (*рівнів Ландау*, які з'являються в полі, на яких знаходяться електрони) у графені суттєво відрізняється від послідовності подібних рівнів у металах і напівпровідниках. Якщо в останніх вона еквідистантна, то в діраківському випадку – це не так. Інша унікальна властивість графену – присутність у спектрі рівня з нульовою енергією, який належить одночасно обом – і валентній, і провідній – зонам, саме існування якого зумовлює нестандартний КЕХ у графені.

Предбачувану поведінку холлівського опору і змогли побачити обидві експериментальні групи [5, 6]. Це забрало будь-які сумніви щодо того, якими квазічастинками є електрони в одношаровому графені, оскільки навіть у двошаровому графені квантування цієї провідності має зовсім інший характер. Тепер кожен із графенів (маємо на увазі графени, що відрізняються числом шарів) розглядають як окремий оригінальний об'єкт, властивості якого активно досліджують на предмет порівняння один з одним і можливого оптимального застосування в техніці.

Підсумовуючи, підкреслимо, що заслуга А. Гейма і К. Новосьолова не зводиться лише до першого у світі отримання графену, адже їм належать відкриття, піонерські дослідження численних дуже незвичайних властивостей матеріалу – величезної рухливості квазічастинок, мінімальної провідності, квантового ефекту Холла, надзвичайної прозорості. Принципово важливе і те, що графен дав змогу досліджувати ефекти, притаманні релятивістській фізиці, не за допомогою дуже коштовних прискорювачів, а у звичайних, відносно недорогих, лабораторіях для досліджень із фізики твердого тіла. Яскравим прикладом цього став передбачений ще 1929 р. парадокс Клейна (Oscar Klein), або аномально висока ймовірність тунелювання релятивістських частинок крізь потенціальні бар'єри, реалізації якого у графені присвячено теоретичну роботу [8] і який дійсно спостерігала 2009 р. група Ф. Кіма.

Щодо цікавих властивостей одношарового графену, то, як було з'ясовано дещо пізніше [5, 6], ще одна міжнародна група теоретиків у складі американця Антоніо Кастро Нето (Antonio Castro Neto), іспанця Франціско Г'їнея (Francisco Guinea), португальця Нуно Мігуеля Переша (Nuno Miguel Peres) незалежно прийшла до того ж висновку про аномальний КЕХ у графені [9], розглядаючи поведінку так званої фази Беррі. Виявляється, через діраківський характер квазічастинок квантово-механічна хвильова функція квазічастинок у графені не переходить сама в себе при обертанні на кут  $360^\circ$ , змінюючи свій знак, що тотожне зміні її фази на число  $\pi$ . Тому можна зробити висновок, що КЕХ у графені має бути відмінним від відомого [3]. Потім обидві згадані експериментальні групи у спільній роботі (2007) продемонстрували, що КЕХ у графені можна спостерігати навіть за кімнатних температур.

Оскільки визначення фази Беррі квантових магнітних осциляцій дає можли-

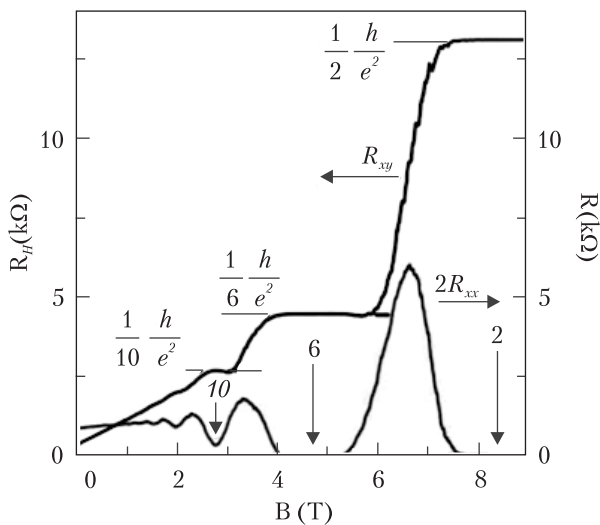
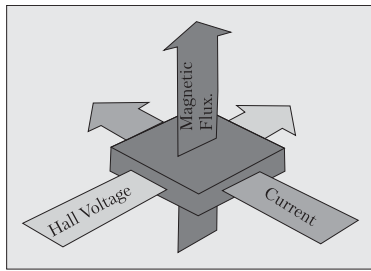


Рис. 4. Схема вимірювання ефекту Холла, а також вигляд експериментальних кривих холлівського опору з характерними поличками, що відповідають його квантуванню у графені [6]

вість ідентифікувати основні характеристики електронної підсистеми матеріалів, слушно згадати роботу 1999 р. про графіт українських теоретиків Г.П. Микитика і Ю.В. Шарлая з Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України (Харків), цитовану в обох пріоритетних для досліджень графену статтях [5, 6].

#### ОЧІКУВАННЯ І ПРОГНОЗИ

За шість років, що минули з моменту Отримання графену, виконано величезний обсяг фундаментальних експери-

ментальних і теоретичних досліджень. Наприклад, останні результати спостереження дробового КЕХ показують [10], що графен став одним з найважливіших об'єктів саме фундаментальних досліджень. Тим не менше, попри такий теперішній статус графену, очевидно, що дуже велику увагу приділено його практичним застосуванням. Можна сподіватись на створення працездатних і вироблених у промислових умовах графенових транзисторів. Так, нещодавно прозорий лист графену розміром понад 70 см (!) став основою міцного сенсорного екрана [11]. Графен може бути також ефективним газовим сенсором, який відчуває присутність навіть однієї молекули газу на своїй поверхні [12]. Нові композитні матеріали на основі графену можуть знайти застосування в космічних супутниках і літаках. Як швидко здійсниться мрія «graphenium inside» або з'явиться графеновий процесор і скільки буде практичних застосувань не лише графену, але і його похідних, покажуть майбутні дослідження, які все інтенсивніше ведуться в лабораторіях розвинених країн.

Нобелівська премія вивела графен на перші шпальти не тільки наукових видань — він і його винахідники стали героями численних ЗМІ, Інтернету, що викликало неабиякий інтерес до нового матеріалу широкої непрофесійної аудиторії. Проте варто згадати й професіоналів, теоретичні дослідження яких так чи інакше стосувалися графеноподібних систем і велися ще до фактичного відкриття самого графену. Без перебільшення, тут також можна говорити про помітний внесок у фізику релятивістських електронних систем таких українських теоретиків, як Е.В. Горбар, В.А. Міранський, І.В. Криве, Ю.О. Ситенко, І.А. Шовковий та інші, тепер залучених до активних досліджень графену. Але справжній графеновий бум почався наприкінці 2005 р. після



публікації статей [5, 6]. На щастя, не оминув він і України, де незвичайні властивості графену не могли не викликати зацікавлення багатьох теоретиків. Ф.Ф. Васько, В.О. Кочелап, Л.І. Малишева, О.І. Оніпко, Ю.В. Скрипник, М.В. Стріха, В.О. Ямпольський — далеко не повний перелік українських фізиків, які останніми роками видали публікації на графенову тематику<sup>4</sup>.

\* \* \*

Як бачимо, в Україні більшість досліджень графену має теоретичний характер. Фізики-теоретики, включаючи авторів, не маючи змоги співпрацювати з вітчизняними експериментальними групами, змушені шукати прямих контактів із зарубіжними експериментаторами, зокрема, беручи участь у спільних грантах. Це дає змогу швидко дізнаватися про результати нових досліджень і певною мірою компенсує вимушену відмову вітчизняних науковців (через фінансову скруту) від участі у зарубіжних міжнародних конференціях. Водночас, включення українських фізиків-експериментаторів до світових досліджень графенів і споріднених сполук, було б не тільки бажаним, а й необхідним. Багато експертів прогнозують, що початок ХХІ ст., ознаменований науковим поживавленням, яке породило відкриття графену, за багатьма ознаками

<sup>4</sup> Кількість робіт, присвячених графену, сягає кількох тисяч. І згадати всіх авторів, які мають хоч яке-небудь відношення до України, просто неможливо. Проте, слід відзначити, що у групі А. Гейма працюють українські експериментатори В.Г. Кравець і О.М. Григоренко. Крім того, В.І. Фалько, один із провідних фахівців у теоретичних дослідженнях графену, керівник кафедри з теорії конденсованого стану в університеті Ланкастера (Англія), вчився у Харківському університеті.

свідчить про започаткування нового етапу в розвитку фізики, а саме: народження вуглецевої електроніки, яка, напевно, має прийти на зміну кремнієвій зокрема і напівпровідниковій узагалі.

1. Graphene // Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010. The Royal Swedish Academy of Sciences. — 12 p.
2. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science. — 2004. — Vol. 306, №5696. — P. 666–669.
3. A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M. Peres Drawing Conclusions from Graphene // Physics World. — 2006. — Vol. 19. — P. 34–38.
4. T. Chakraborty Graphene: a nanoscale quantum playing field // Physics in Canada. — 2006. — Vol. 63. — P. 351–354.
5. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov et al. Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene // Nature. — 2005. — Vol. 438. — P. 197–200.
6. Y. Zhang, Y.-W. Tan, H.L. Stormer, P. Kim Experimental Observation of Quantum Hall Effect and Berry's Phase in Graphene // Nature. — 2005. — Vol. 438. — P. 201–204.
7. V.P. Gusynin, S.G. Sharapov Unconventional Integer Quantum Hall Effect in Graphene // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 95.
8. M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov, A.K. Geim Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene // Nature Phys. — 2006. — Vol. 2. — P. 620–625.
9. N.M.R. Peres, F. Guinea, A.H. Castro Neto Electronic Properties of Disordered Two-Dimensional Carbon // Phys. Rev. — 2006. — Vol. 73.
10. C.R. Dean, A.F. Young, P. Cadden-Zimansky, L. Wang, H. Ren, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Kim, J. Hone, K.L. Shepard Multicomponent fractional quantum Hall effect in graphene // arXiv:1010.1179(2010).
11. S. Bae, H. Kim, Y. Lee et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes // Nature Nanotechnology. — 2010. — Vol. 5. — P. 574–578.
12. F. Schedin, A.K. Geim, S.V. Morozov, E.W. Hill, P. Blake, M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene // Nature Materials. — 2007. — Vol. 6. — P. 652.