



Научни основи на Нобеловата награда по физика за 2010 г.

Графен

1. Един нов клас материали

Наскоро бяха открити и изучени двумерни (2D) кристални материали (1). Първият материал от този нов клас е графенът, едноатомен слой от въглерод. Този нов материал притежава редица уникални свойства, които го правят интересен както за фундаментални изследвания, така и за бъдещи приложения. Електронните свойства на този 2D-материал са причина, например, за един аномален квантов Хол-ефект (2, 3). Той е прозрачен проводник (4) с дебелина е един атом. При него също така се срещат аналогии с физиката на елементарните частици, включително един екзотичен тип тунелиране (5, 6), който бе предсказан от шведския физик Оскар Клайн (7).

В допълнение графенът притежава някои забележителни механични и електрични свойства. Той е съществено по-здрав от стоманата и е много разтеглив. Неговите топло- и електропроводност са много големи и може да се използва като гъвкав проводник.

С Нобеловата награда по физика за 2010 г. са удостоени двама учени, които са направили решителни приноси в тази област. Това са **Андрей К. Гейм** и **Константин С. Новоселов**, и двамата от Университета на Манчестър, Великобритания. Те успяха да получат, да изолират и да характеризират графена (1).

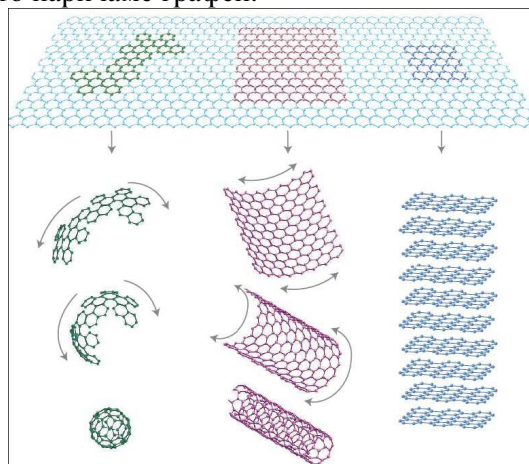
2. Различни форми на въглерода

Безспорно въглеродът е най-интересният елемент в периодичната система. Той е основата на ДНК и на живота като цяло на Земята. Въглеродът може да съществува в няколко различни форми. Най-обикновеното форма на въглерода е графита, който се състои от натрупани на куп листове въглерод с хексагонална структура. При високо налягане са формира диамант, който представлява метастабилна форма на въглерода. Една нова форма на въглерода са така наречените фулерени (8). Най-обикновеният, наречен C_{60} , съдържа 60 въглеродни атома и изглежда като футболна топка, направена от 20 шестоъгълника и 12 петоъгълника, което позволява на повърхността да образува сфера. През 1996 г. откриването на фулерените бе удостоено с Нобелова награда по химия.

От няколко десетки години е известна и една квази-едномерна форма на въглерода, въглеродните нанотръбички (9), между които и нанотръбички с единични стени – от 1993 г. (10, 11). Последните може да се получат от листове на графен като се навият, за да образуват тръба, а краищата им са полусферични по същия начин, като при фулерените. Електронните и механичните свойства на металните нанотръбички с единични стени са подобни на тези на графена.

Добре известно бе, че графитът се състои от натрупани един върху друг листове хексагонални въглерод, но се смяташе, че един подобен единичен лист не може да се

получи в свободна форма. Затова за физичната общност бе изненада, когато през 2004 г. Константин Новоселов, Андрей Гейм и техните сътрудници показаха, че такъв отделен слой може да бъде изолиран и, че той е стабилен. Единичният слой въглерод представлява това, което наричаме графен.



Фиг. 1. Можем да представим молекулите на фулерена C_{60} , въглеродните нанотръбички и графита като образувани от листове графен, т.е. от единични листове от въглеродни атоми, подредени като килийки на пчелна пита (12).

Трябва да се отбележи, че подобни на графен структури бяха познати още през 60-те години на миналия век, но съществуваша експериментални пречки за изолирането на отделни листове (13–16) и съмнения, че това е практически възможно.

Интересно е, че всеки, който е ползвал един обикновен молив, вероятно е получавал подобни на графен структури, без да знае това. Моливът съдържа графит и, когато го движим по хартията, от графита се отцепват тънки слоеве, които се разполагат върху хартията и образуват текста или рисунката, които искаме да направим. Само някои от тези тънки слоеве съдържат малък брой или даже единичен слой графит, т.е. – графен.

Следователно трудността бе не направата на графенови структури, а изолирането на достатъчно големи отделни листове с цел да се идентифицира и характеризира графенът и да се проверят неговите уникални двумерни (2D) свойства. Това именно успяха да направят Гейм, Новоселов и техните сътрудници.

3. Какво представлява графенът?

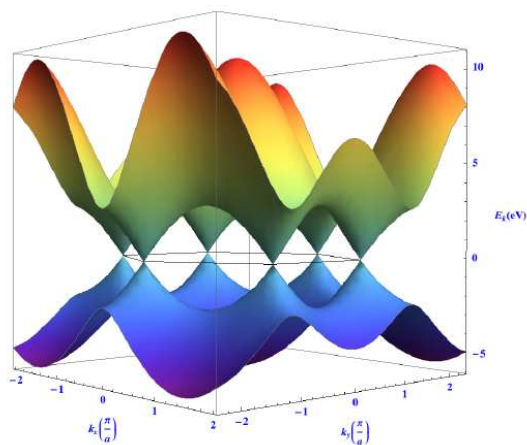
Графенът представлява единичен слой въглеродни атоми, подредени в решетка, състояща се от шестоъгълни елементи (като килийките на восъчна пчелна пита), като разстоянието между два съседни въглеродни атома е 0,142 nm. Той е първият истински двумерен кристален материал и е представител на цял клас 2D-материали, включващ например единични слоеве от борен нитрид (BN) и молибденов дисулфид (MoS_2), които бяха получени след 2004 г. (17).

Електронната структура на графена е твърде различна от тази на обикновените обемни материали. Неговата повърхност на Ферми се характеризира с три двойки конуси, както се вижда от фиг. 2. В истинския (същинския, нелегиран) графен нивото на Ферми се намира в точките, в които се допират тези конуси. Тъй като в такава точка плътността на състоянията в материала е нула, електричната проводимост на истинския

графен е твърде ниска и е от порядъка на кванта на проводимост $\sigma \sim \frac{e^2}{h}$; точната

стойност на коефициента още се обсъжда. С помощта на електрично поле обаче нивото на Ферми може да се промени, така че материалът да стане или с n -проводимост (с електронна проводимост), или p -проводимост (с дупчеста проводимост) – в зависимост от посоката на приложеното поле. Графенът може също така да бъде легиран чрез адсорбиране на повърхността си, например, на вода или амоняк. Възможно е електричната проводимост на легирания графен да бъде твърде висока, при стайна температура би могла да бъде даже по-голяма от тази на медта.

Близо до нивото на Ферми законът на дисперсията за електроните и дупките е линеен. Доколкото ефективните маси се дават от кривината на енергетичните зони, това съответства на нулева ефективна маса. Уравнението, описващо възбужденията в графена, формално съвпада с уравнението на Дирак за безмасови фермиони, които се движат с постоянна скорост. Ето защо точките, в които се допират конусите, се наричат Диракови точки. Това поражда интересни аналогии между графена и физиката на елементарните частици, които имат място до енергии от приблизително 1 eV, където законът на дисперсията става нелинеен. Един резултат от този специален закон на дисперсията е, че квантовият Хол-ефект в графена става необикновен (вж. фиг. 4).



Фиг. 2. Енергията E на възбужденията в графена като функция от вълновите числа k_x и k_y , в посока на осите Ox и Oy . Черната линия представлява енергията на Ферми за един нелегиран графенов кристал. Близо до това ниво на Ферми енергетичният спектър се характеризира с шест двойни конуса, където законът на дисперсията (зависимостта на енергията от импулса, $\hbar k$) е линеен. Това съответства на безмасови възбуждения.

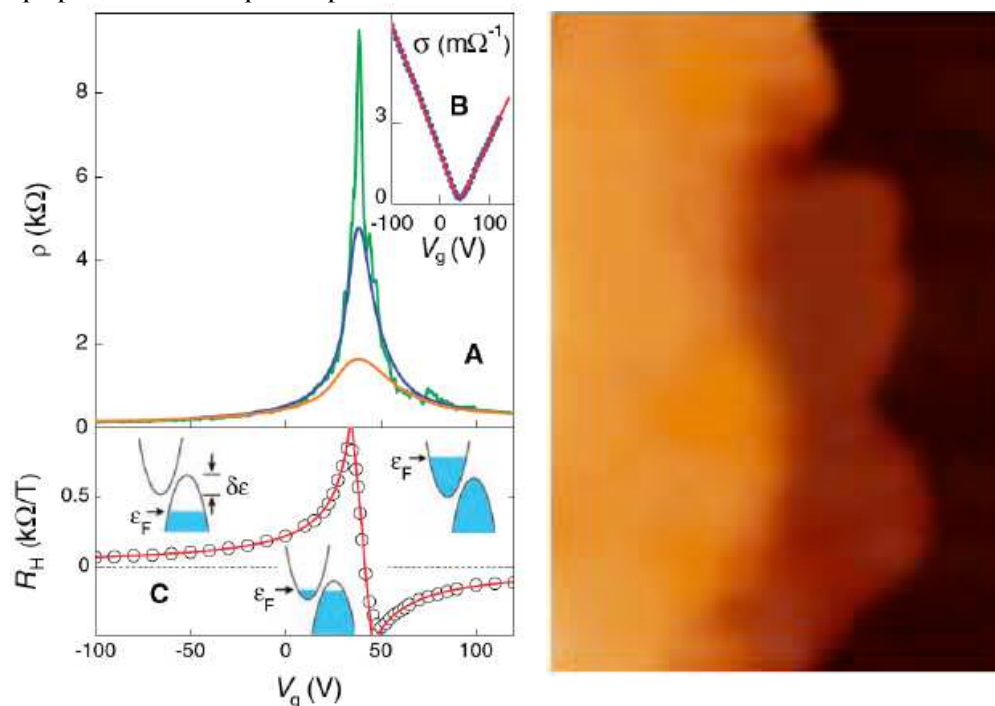
Графенът е практически прозрачен. В оптичната област той поглъща едва 2,3 % от светлината. Това число фактически се изразява посредством π и α , където α е константата на фината структура, която определя интензивността на електромагнитното взаимодействие. За разлика от нискотемпературните 2D-системи, основаващи се на полупроводници, графенът поддържа своите 2D-свойства и при стайна температура. Графенът притежава също така и някои други интересни свойства, общи за него и за нанотръбчиците. Той е съществено по-здрав от стоманата, много разтеглив и може да се използва като гъвкав проводник. Неговата топлопроводност е много по-голяма от тази на среброто.

4. Откриването на графена

Графенът е изследван теоретично още през 1947 г. от П. Р. Уолъс (18) като учебнически пример за пресмятаня във физиката на твърдото тяло. Той предсказва

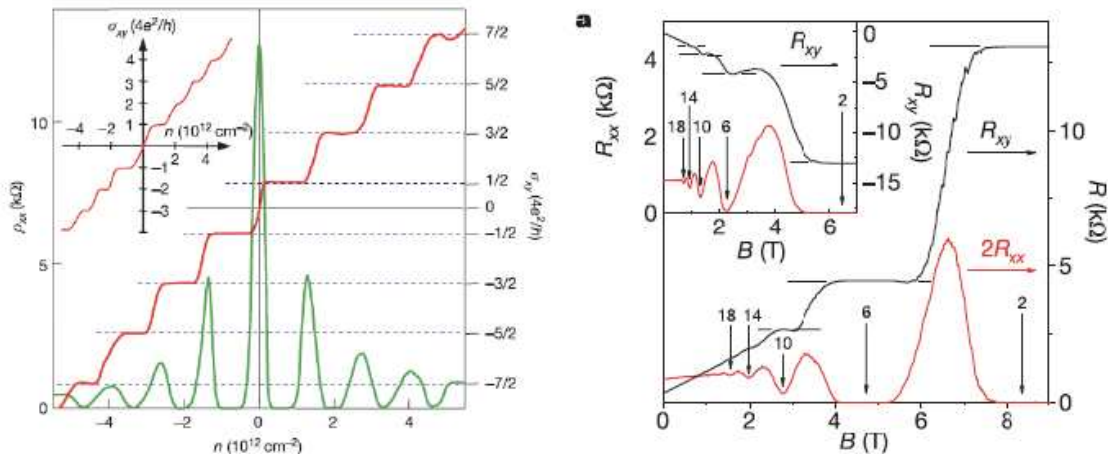
електронната структура и отбелязва линейния закон на дисперсията. През 1956 г. Дж. У. МакКлуре (19) вече записва вълновото уравнение за възбужденията, а приликата му с уравнението на Дирак бе дискутирана от Г. В. Семенов през 1984 г. (20), вж. също Ди Винченцо и Меле (21).

Преди 2004 г. се предполагаше, че изолирането на стабилни листове графен не е възможно. Ето защо беше абсолютна изненада, когато Андрей Гейм, Константин Новоселов и техните сътрудници от Университета на Манчестър (Великобритания) и от Института по микроелектронна технология в Черноголовка (Русия), успяха да направят точно това. Те публикуваха своите резултати през октомври 2004 г. в сп. *Science* (1). Те използват прост, но ефективен механичен начин за извличане на тънки слоеве графит чрез обелване с помощта на скоч-лента от кристал графит, с последващо пренасяне на тези слоеве върху силициева подложка. За пръв път този метод бе предложен и пробван от групата на Р. Руоф (22), които обаче не бяха в състояние да идентифицират каквито и да е монослоеви. Манчестерската група успя, като използва оптичен метод, с който можаха да идентифицират фрагменти, съставени от само няколко слоя. На фиг. 3 е показана снимка, получена с атомно-силов микроскоп (AFM), на един такъв образец. В някои от случаите люспиците са съставени от единичен слой, с което графенът бе идентифициран. По нататък те успяха да присъединят електроди към образец от графен, за да измерват ефекта на Хол.



Фиг. 3. В ляво. А) Специфичното (надлъжно) съпротивление на образец от графен при три различни температури (5 К – зелено, 70 К – синьо, 300 К – оранжево). Обърнете внимание на амбиполярната зависимост от напрежението на гейта. В) Проводимостта като функция от напрежението на гейта при 77 К. С) Холовото специфично съпротивление като функция на напрежението на гейта за същия образец (1).

В дясно. Снимка с атомно-силов микроскоп на единичен слой графен. Черната област е подложката, тъмно оранжевата е монослойт графен и има дебелина $\sim 0,5$ nm, а светло оранжевият участък съдържа няколко слоя и е дебел ~ 2 nm (23).



Фиг. 4. Експериментално наблюдение на аномалния ефект на Хол в графен.

В ляво. Холова специфична проводимост (червено) и надлъжно специфично съпротивление (зелено) като функция от плътността на токовите носители. Добавката горе в ляво показва холовата специфична проводимост за двоен слой графен.

Отбележете, че разстоянието между хоризонталните участъци за графена е $\frac{4e^2}{h}$, т.е. по-голямо, отколкото за обикновения квантов Хол-ефект и стъпалата са при полуцели кратни на тази стойност. За двойния слой графен височината на всяко стъпало е същата, но стойностите на стъпалата са целочислено кратни на $\frac{4e^2}{h}$, като липсва стъпало при нулева плътност (2).

В дясно. Надлъжното и холовото специфично съпротивление като функция от индукцията на магнитното поле за един образец, легиран с електрони. Добавката горе в ляво показва същите данни за образец, легиран с дупки.

По такъв начин те успяха да измерят както (надлъжното) специфично съпротивление, така и холовото специфично съпротивление. Съществена част от данните бе амбиполярният полев ефект, където специфичното съпротивление бе измервано като функция от приложеното електрично поле, перпендикулярно на образца. Данните са показани на фиг. 3. Специфичното съпротивление на листа има ясно изразен максимум и спада от двете му страни. Това свидетелства за нарастващо легиране с електрони на дясно и с дупки на ляво от максимума. Отбележете, че максималното специфично съпротивление на листа е $\sim 9 \text{ k}\Omega$, което е от порядъка на квантовото съпротивление.

Щом бе установена технологията за получаване, идентифициране и прикрепване на електроди към графена, както Манчестерската група, така и другите групи бързо извършиха голям брой нови експерименти (2, 3, 17, 24, 25). Те включват изследване на аномалния ефект на Хол, а също така приготвянето на други 2D-кристални материали като например монослоеве от BN.

Освен метода на обелване, бяха изследвани също така различни начини за израстване на много тънки въглеродни филми, като по-специално това бе направено от една група, ръководена от В. А. де Хеер в Технологичния институт на Джорджия. Те усъвършенстваха метода за изгаряне на силиция от повърхността на силициев карбид (SiC), което оставя един тънък слой въглерод. Това се постига чрез нагряване на кристал от SiC до около $1300 \text{ }^\circ\text{C}$. Преди това методът бе използван от няколко групи

(14, 15), но тези ранни изследвания се съсредоточаваха върху изучаването на повърхността и не бяха правени измервания на явленията на пренос. През декември 2004 г., точно два месеца след публикуването на статията на Новоселов *et al.*, групата на де Хеер публикува своята първа статия за измерването на транспортните свойства на тънки въглеродни филми (26). Те представят измервания на магнитното съпротивление и също един слаб електричен полеви ефект. Де Хеер и сътрудниците му притежават също така патент за направата на електронни прибори от тънки въглеродни слоеве (27).

Ръководена от П. Ким група от Университета на Колумбия изследва един алтернативен подход за правене на тънки въглеродни слоеве. Те прикрепват кристалче графит към острието на атомно-силов микроскоп и го влачат по една повърхност. По този начин те са в състояние да направят тънки слоеве графит, състоящи се най-малко от 10 едноатомни слоя.

Както бе споменато по-горе, нелинейният закон на дисперсия води до аномален квантов ефект на Хол. Това бе демонстрирано независимо от две групи – манчестерската група и групата, водена от П. Ким; понастоящем и двете групи използват метода на обелването. Техните две статии са публикувани една след друга в един и същ брой на сп. *Nature* от ноември 2005 г. Данните може да се видят на фиг. 4.

След 2005 г. развитието на тази област за изследвания буквално експлодира, предизвиквайки като резултат нарастващ брой статии за графена и неговите свойства. Двойните слоеве от графен, които имат различни свойства в сравнение с (еднослойния) графен, също бяха изследвани подробно (28–32). За да се изследва дробният квантов ефект на Хол в графена бяха проведени изследвания в силни магнитни полета (33, 34). Освен това изследванията на механичните свойства на графена показаха, че неговата механична якост е извънредно голяма, стотици пъти по-голяма, отколкото най-здравата стомана (35). Друго важно откритие бе споменатият по-горе факт, че поглъщането на светлината от графена е свързано с константата на фината структура (36).

Появиха се също така известен брой важни статии, описващи аналозиите с физиката на елементарните частици, основани на уравнението на Дирак. Формалната прилика между възбужденията в графена и двумерните Диракови фермиони позволи да се провери така нареченото тунелиране на Клайн, което бе предложено от шведския физик Оскар Клайн (7). Това явление предсказва, че една бариера може да се окаже напълно прозрачна за падащи нормално безмасови частици. При определени условия прозрачността като функция от енергията може също така да осцилира. Катцелсън, Гейм и Новоселав през 2006 г. предложиха да се провери това предсказание в графен (5) и то бе потвърдено от Юнг и Ким през 2009 г. (6).

5. Бъдещи приложения

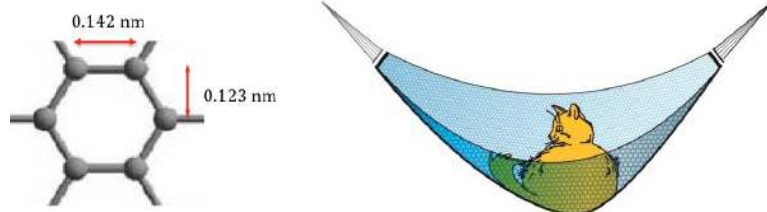
Графенът притежава определени свойства, които го правят интересен за няколко приложения. Той е максимално тънък, много здрав механически, прозрачен и гъвкав проводник. Неговата проводимост може да бъде променяна в широки граници или чрез химично легиране, или чрез електрично поле. Подвижността на токовете носители в графена е много висока (30), което го прави много интересен материал за високочестотни приложения в електрониката (37). Напоследък стана възможно да се изготвят големи листове графен. С помощта на почти индустриални методи са получени листове с широчина 70 cm (8, 39). Доколкото графенът е прозрачен проводник, той може да се използва в приложения като екрани, които реагират на докосване (тъч-скрийн), светлинни панели и слънчеви елементи, където той може да измести по-чувствителния индиево кален оксид (ITO). Гъвкавата електроника и газовите сензори са други възможни приложения (40, 41). Квантовият ефект на Хол в графена също би могъл да допринесе за създаване на един още по-точен стандарт за

съпротивление в метрологията (42). В спътниците и самолетите може да намерят интересни приложения основани на графен нови типове композитни материали, които притежават голяма здравина и малка плътност (43, 44).

6. Заключение

Разработването на този нов материал разкрива нови интересни възможности. Той е първият кристален двумерен материал и притежава уникални свойства, които го правят интересен както за фундаменталната наука, така и за бъдещите приложения. Пробивът в тази посока бе направен от Гейм, Новоселов и техните сътрудници; именно тяхната статия от 2004 г. стартира разработките в тази област. Ето защо те бяха удостоени с Нобеловата награда по физика за 2010 г.

Приложение. Някои свойства на графена



Плътност на графена

Елементарната шестоъгълна клетка на графена съдържа два въглеродни атома и има площ $0,052 \text{ nm}^2$. Оттук може да пресметнем, че плътността му е $0,77 \text{ mg/m}^2$. Следователно масата на един въображаем хамак от графен с площ 1 m^2 би била едва $0,77 \text{ mg}$.

Прозрачност на графена

Графенът е почти прозрачен, той поглъща само 2,3 % от интензитета на светлината, независимо от дължината на вълната в оптичната област. Това число се изразява чрез π и α , където α е константата на фината структура. Ето защо провесеният (т.е. свободен, не върху подложка) графен е безцветен.

Здравина на графена

Границата на здравината на разкъсване за графена е 42 N/m . Същата характеристика за стоманата е в границите на $250\text{--}1200 \text{ MPa} = (0,25 - 1,2) \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. За въображаем стоманен филм със същата дебелина като графена (за която можем да приемем стойността $3,35 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, т.е. дебелината на един слой в графита), това би дало двумерна граница на здравината на разкъсване от $0,084$ до $0,40 \text{ N/m}$. Следователно графенът е повече от 100 пъти по-здрав от стоманата.

В нашия завързан между две дървета хамак с площ 1 m^2 можете да поставите тяло с маса около 4 kg , без той да се прокъса. Следователно би било възможно да направите почти невидим хамак от графен, който би издържал котка. При това хамакът би тежал по-малко от 1 mg , което съответства на теглото на един косъм от мустаците на котката.

Електропроводност на графена

Специфичната проводимост на лист от двумерен материал е $\sigma = en\mu$. При плътност на токовите носители $n = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ тяхната подвижност теоретично се ограничава от акустичните фонони до $\mu = 200\,000 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Тогава двумерното

специфично съпротивление на листа, наричано още съпротивление за квадрат, е 31Ω . Следователно съпротивлението на нашия хипотетичен хамак би било 31Ω .

Като използваме дебелината на слоя, за обемната специфична проводимост на графена получаваме $0,96 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. Това е малко повече от проводимостта на медта, която е $0,60 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Топлопроводност

Специфичната топлопроводност на графена се доминира от фононите и измерванията ѝ дават стойност приблизително $5000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. При стайна температура медта има специфична топлопроводност $401 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Следователно графенът провежда топлината 10 пъти по-добре от медта.

Литература

1. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, *Science* **306**, 666 (2004).
2. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, M. I. Katsnelson, I. V. Grigorieva, S. V. Dubonos, and A. A. Firsov, *Nature* **438**, 197 (2005).
3. Y. B. Zhang, Y. W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, *Nature* **438**, 201 (2005).
4. R. Nair, P. Blake, A. Grigorenko, K. Novoselov, T. Booth, T. Stauber, N. Peres, and A. Geim, *Science* **320**, 1308 (2008).
5. M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, *Nature Physics* **2**, 620 (2006).
6. A. F. Young and P. Kim, *Nature Physics* **5**, 222 (2009).
7. O. Klein, *Z Phys.* **53**, 157 (1929).
8. H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, *Nature* **318**, 162 (1985).
9. A. Oberlin, M. Endo, and T. Koyama, *Journal of Crystal Growth* **32**, 335 (1976).
10. S. Iijima and T. Ichihashi, *Nature* **363**, 603 (1993).
11. D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. Devries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, and R. Beyers, *Nature* **363**, 605 (1993).
12. A. K. Geim and K. S. Novoselov, *Nature Materials* **6**, 183 (2007).
13. H. P. Boehm, A. Clauss, U. Hofmann, and G. O. Fischer, *Zeitschrift Für Naturforschung* **B 17**, 150 (1962).
14. A. Van Bommel, J. Crombeen, and A. Van Tooren, *Surface Science* **48**, 463 (1975).
15. I. Forbeaux, J. Themlin, and J. Debever, *Physical Review B* **58** 16396 (1998).
16. C. Oshima, A. Itoh, E. Rokuta, and T. Tanaka, *Solid State Communications* **116**, 37 (2000).
17. K. S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T. J. Booth, V. V. Khotkevich, S. V. Morozov, and A. K. Geim, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **102**, 10451 (2005).
18. P. R. Wallace, *Physical Review* **71**, 476 (1947).
19. J. W. McClure, *Physical Review* **104**, 666 (1956).
20. G. W. Semenoff, *Physical Review Letters* **53**, 2449 (1984).
21. D. P. DiVincenzo and E. J. Mele, *Phys. Rev. B* **29**, 1685 (1984).
22. X. K. Lu, M. F. Yu, H. Huang, and R. S. Ruoff, *Nanotechnology* **10**, 269 (1999).
23. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, Supporting material for *Science* **306**, 666 (2004).
24. Barbolina, II, K. S. Novoselov, S. V. Morozov, S. V. Dubonos, M. Missous, A. O. Volkov, D. A. Christian, I. V. Grigorieva, and A. K. Geim, *Applied Physics Letters* **88**, 013901 (2006).

25. E. W. Hill, A. K. Geim, K. Novoselov, F. Schedin, and P. Blake, *IEEE Transactions on Magnetics* **42**, 2694 (2006).
26. C. Berger, Z. M. Song, T. B. Li, X. B. Li, A. Y. Ogbazghi, R. Feng, Z. T. Dai, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P. N. First, and W. A. de Heer, *J. of Physical Chemistry B* **108**, 19912 (2004).
27. W.A. de Heer, C. Berger, and P. N. First, Patterned thin film graphite devices and methods for making same., US 7015142 B2
28. E. V. Castro, K. S. Novoselov, S. V. Morozov, N. M. R. Peres, J. Dos Santos, J. Nilsson, F. Guinea, A. K. Geim, and A. H. C. Neto, *Physical Review Letters* **99**, 216802 (2007).
29. A. B. Kuzmenko, E. van Heumen, D. van der Marel, P. Lerch, P. Blake, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, *Physical Review B* **79**, 115441 (2009).
30. S. V. Morozov, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson, F. Schedin, D. C. Elias, J. A. Jaszczak, and A. K. Geim, *Physical Review Letters* **100**, 016602 (2008).
31. K. S. Novoselov, E. McCann, S. V. Morozov, V. I. Fal'ko, M. I. Katsnelson, U. Zeitler, D. Jiang, F. Schedin, and A. K. Geim, *Nature Physics* **2**, 177 (2006).
32. T. Ohta, A. Bostwick, T. Seyller, K. Horn, and E. Rotenberg, *Science* **313**, 951 (2006).
33. K. I. Bolotin, F. Ghahari, M. D. Shulman, H. L. Stormer, and P. Kim, *Nature* **462**, 196 (2009).
34. X. Du, I. Skachko, F. Duerr, A. Luican, and E. Y. Andrei, *Nature* **462**, 192 (2009).
35. C. Lee, X. D. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, *Science* **321**, 385 (2008).
36. R. R. Nair, P. Blake, A. N. Grigorenko, K. S. Novoselov, T. J. Booth, T. Stauber, N. M. R. Peres, and A. K. Geim, *Science* **320**, 1308 (2008).
37. Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H.-Y. Chiu, A. Grill, and P. Avouris, *Science* **327**, 662 (2010).
38. Li, X. S.; Cai, W. W.; An, J. H.; Kim, S.; Nah, J.; Yang, D. X.; Piner, R. D.; Velamakanni, A.; Jung, I.; Tutuc, E.; Banerjee, S. K.; Colombo, L.; Ruoff, R. S. Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils. *Science* (2009), **324**, 1312-1314.
39. Keun Soo Kim, Yue Zhao, Houk Jang, Sang Yoon Lee, Jong Min Kim, Kwang S. Kim, Jong-Hyun Ahn, Philip Kim, Jae-Young Choi, and B. H. Hong, *Nature* **457**, 706 (2009).
40. F. Schedin, A. K. Geim, S. V. Morozov, E. W. Hill, P. Blake, M. I. Katsnelson, and K. S. Novoselov, *Nature Materials* **6**, 652 (2007).
41. K. Novoselov and A. Geim, *Materials Technology* **22**, 178 (2007).
42. A. Tzalenchuk, S. Lara-Avila, A. Kalaboukhov, S. Paolillo, M. Syvajarvi, R. Yakimova, O. Kazakova, T. Janssen, V. Fal'ko, and S. Kubatkin, *Nature Nanotechnology* **5**, 186 (2010).
43. L. Liao, J. Bai, Y. Lin, Y. Qu, and Y. Huang, *Advanced Materials* **22**, 1941 (2010).
44. S. Stankovich, D. A. Dikin, G. H. B. Dommett, K. M. Kohlhaas, E. J. Zimney, E. A. Stach, R. D. Piner, S. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, *Nature* **442**, 282 (2006).