Белорусский государственный университет
Физический факультет
Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники

Графен:
от существующего к возникающему

проф. Н.А. Поклонский

Лекция в минском Планетарии, 29 апреля 2017 г.

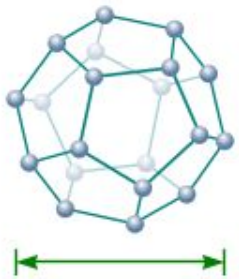
План лекции

1. Классические и квантовые низкоразмерные системы
2. Почему скользит графит? (Ковалентная химическая
   связь: *σ*- и *π*-электроны).
   Слой графита толщиной в 1 атом углерода — графен!
   Электроны и дырки (электронные вакансии в химической связи атомов С).
   Свет и графен
3. *Vestigia semper adore!*
4. ? — универсальный ключ

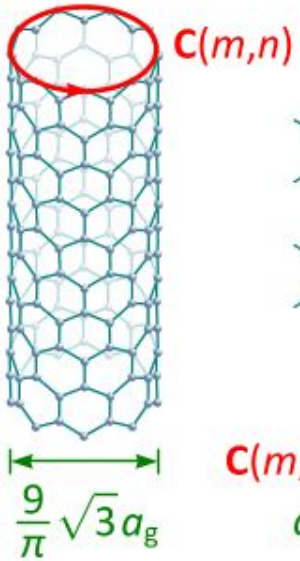
П.Л. Капица. *Эксперимент. Теория. Практика* (М.: Наука, 1987) 496 с.

0-, 1-, 2-, 3-х мерные системы (из углерода)

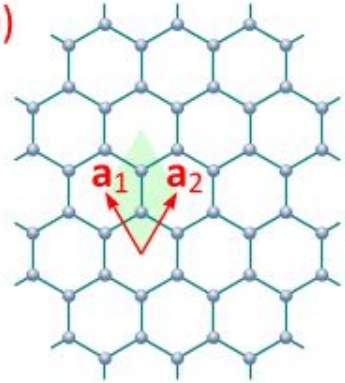
0D
Карбо-додекаэдр C_{20}



1D
SWCNT *zigzag* (9,0)



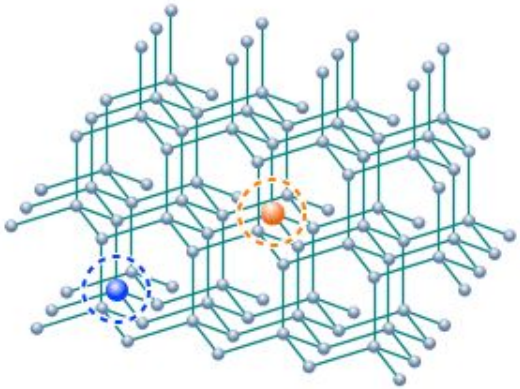
2D
Графен



$\mathbf{C}(m,n) = m\mathbf{a}_1 + n\mathbf{a}_2 \equiv (m,n)$

$a_g = a_{CC} = 0.142$ nm

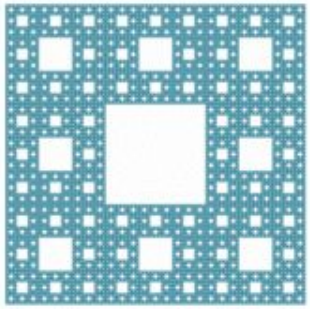
3D
Алмаз (Dia:N,B)



$a_{Dia} = a_{CC} = 0.154$ nm

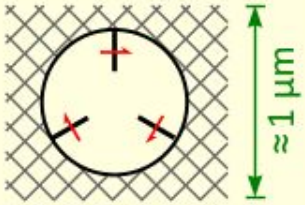
$N_{Dia} \approx 1.76 \cdot 10^{23}$ cm^{-3}

Фрактальная (d)
Квадрат Серпинского



$d = \frac{\ln 8}{\ln 3} \approx 1.89$

Пóра с радикалами в кристаллической матрице алмаза

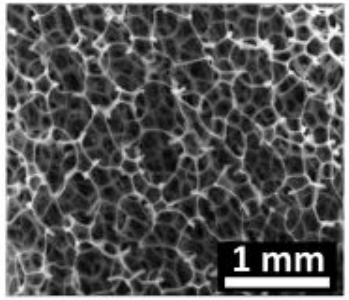


Элемент спинового стекла

Низкоразмерная система — консолидированная система многих частиц, протяженность которой вдоль хотя бы одного направления в пространстве координат сравнима с одним из параметров размерности длины, характеризующих состояния и/или процессы в системе.

Изменяя размер, форму и/или взаимное расположение низкоразмерных систем, можно управлять свойствами состоящих из них наноструктурированных материалов без изменения их химического состава.

Углеродная пена

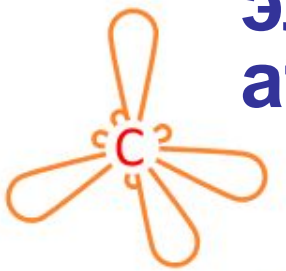


Гибридизация электронных орбиталей атомов углерода

C: $1s^2 2s^2 2p^2$

Алмаз

$a_{C–C}$ = 0.154 nm

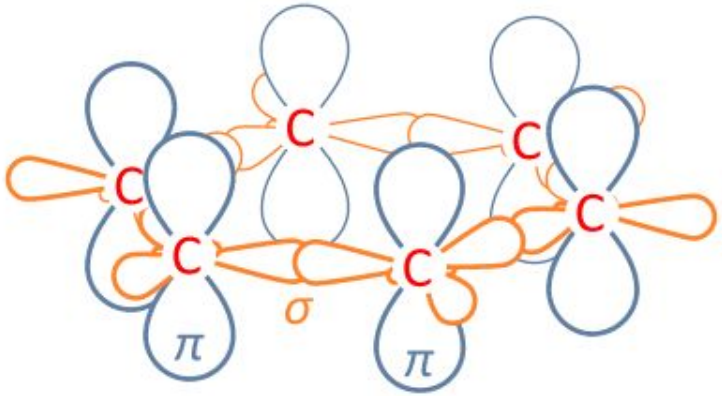


sp^3: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$, $|2p_y\rangle$, $|2p_z\rangle$

Графит

$a_{C–C}$ = 0.142 nm

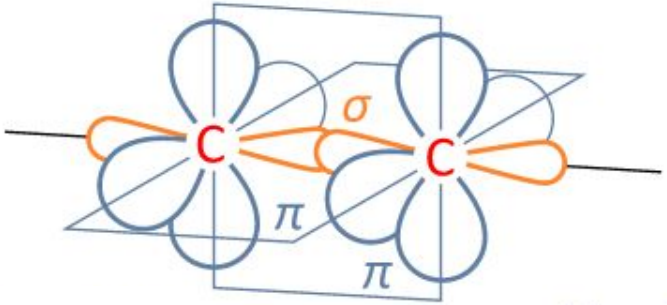
d = 0.341 nm



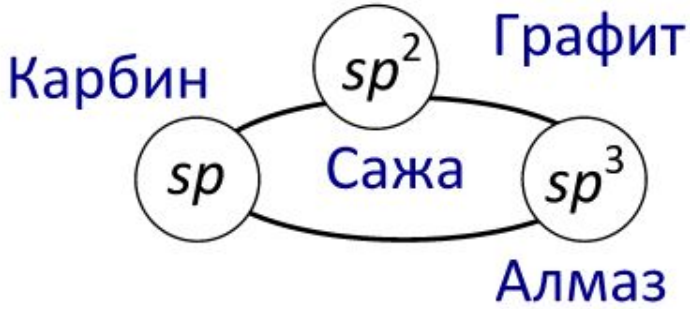
sp^2: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$, $|2p_y\rangle$

Карбин

$a_{C–C}$ = 0.128 nm



sp: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$



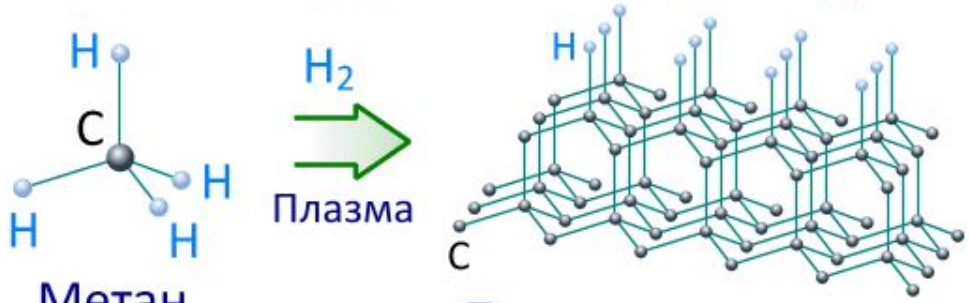
D. Tománek. *Mesoscopic origami with graphite: scrolls, nanotubes, peapods*. Physica B, **323** (1-4), 86 (2002).

Алмазы: цари среди царей

Природный алмаз
616 карат = 123 г

Диск из поликристаллического «дымчатого» CVD-алмаза (∅ = 57 mm, толщина 0.5 mm)

Точечная группа симметрии T_d



Метан

Поверхность алмаза

Б.В. Спицын, Б.В. Дерягин.
Способ наращивания граней алмаза.
А.с. 339134 СССР. Заявл. 10.07.1956,
№ 964957/716353; Опубл. БИ. 1980. С. 323.

В.Г. Ральченко, В.И. Конов. *CVD-алмазы: применение в электронике.* Электроника: Наука, Технология, Бизнес, № 4, 58 (2007).

Синтез монокристаллов алмаза

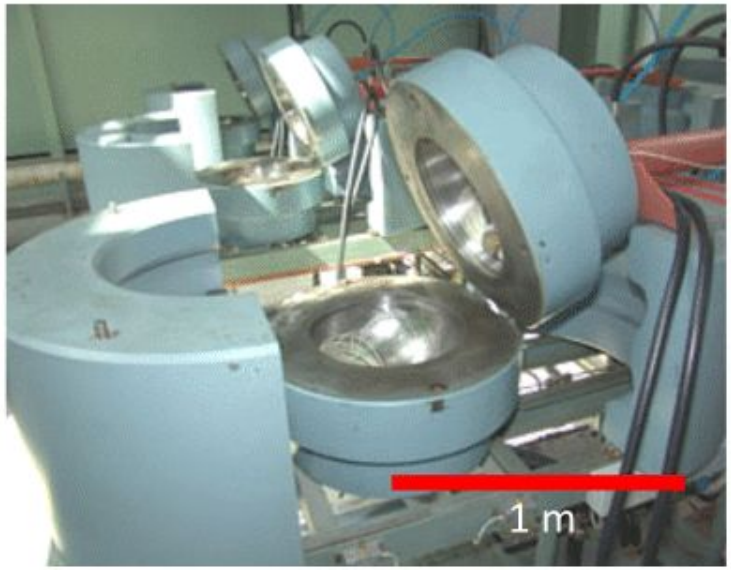
Ni–Fe–C

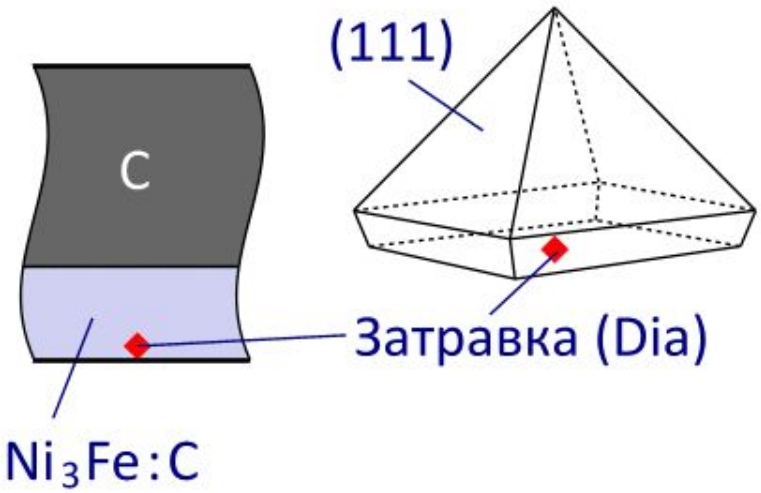
P_s = 5.5 GPa

T_s = 1500 °C

t_s ≈ 70 h

$I \cdot U$ = 1.3 kW





1 carat = 200 mg

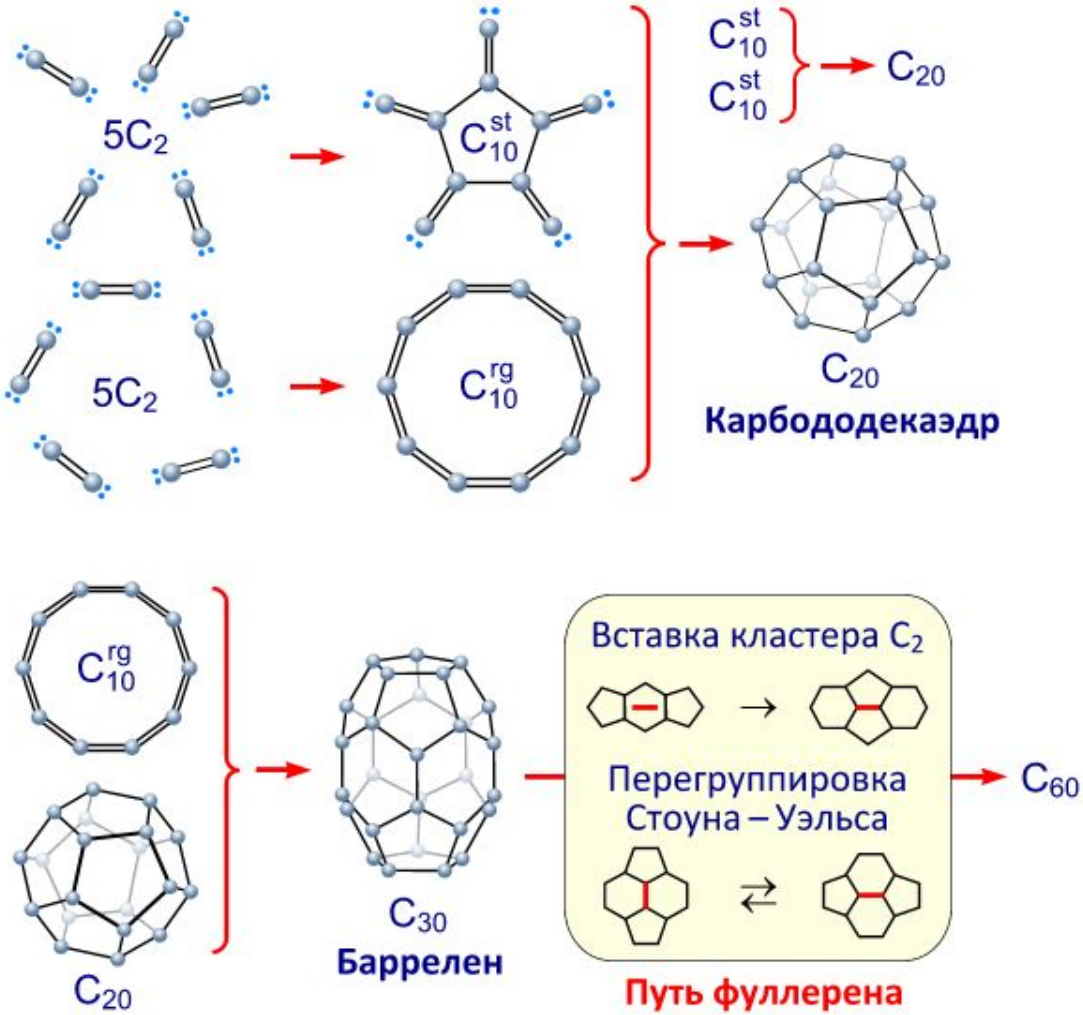
1 atm = $1.013 \cdot 10^5$ Pa

Алмазы массой до 3 карат выращиваются на аппаратах типа «разрезная сфера» методом температурного градиента (РУП «Адамас» при Белорусском государственном университете, г. Минск).

В.С. Соловьев и др. Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1, № 2, 31 (2000).

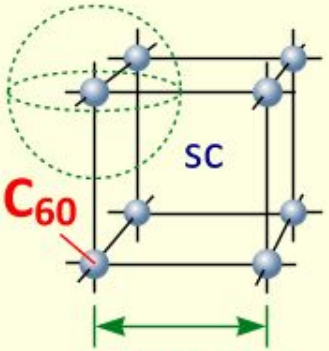
Биосфера Бакминстера Фуллера (Экспо-67, Монреаль, Канада)

Формирование фуллеренов (в угеродной плазме)



Фуллерит

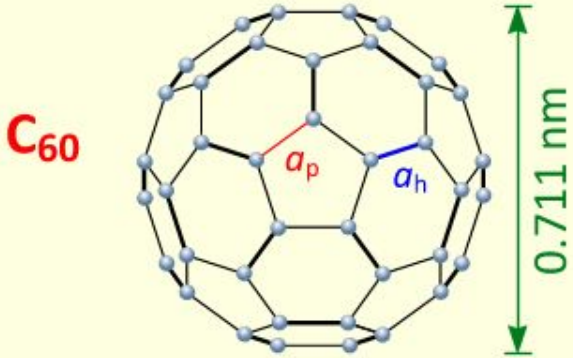
($T \approx 78$ K, ориентационное стекло)



$$\frac{^{12}C}{^{13}C} = \frac{98.89}{1.11}$$

^{13}C — NMR

$T = 300$ K: fcc, пластический кристалл



$a_h = 0.1384$ nm

$a_p = 0.1458$ nm

N.A. Poklonski, S.V. Ratkevich, S.A. Vyrko. *Quantum-chemical calculation of carbododecahedron formation in carbon plasma.* J. Phys. Chem. A, **119** (34), 9133–9139 (2015).

Мир углерода (C: $1s^2\,2s^2\,2p^2$)

$C_p \propto T^3$

Кубический
Гексагональный

Алмаз

a_{CC} = 0.154 nm

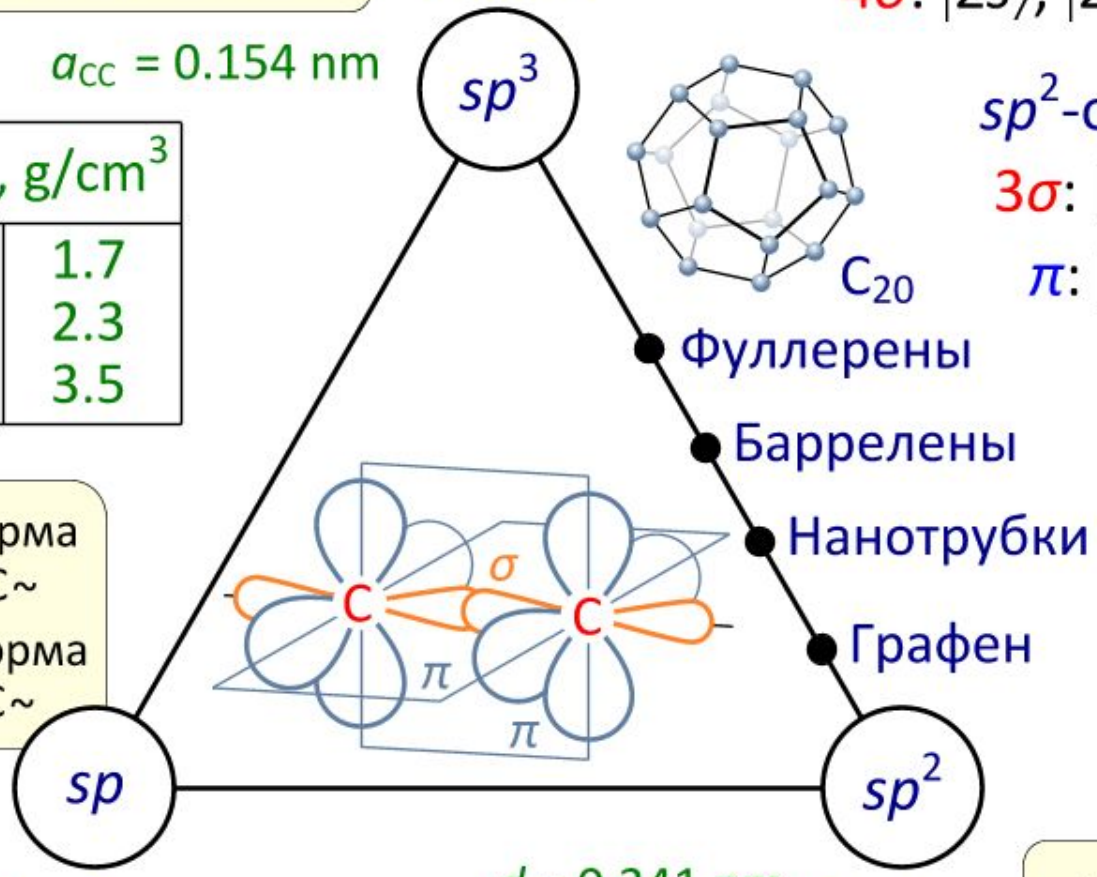
Плотность, g/cm^3	
Фуллерит	1.7
Графит	2.3
Алмаз	3.5

Полииновая форма
~C≡C–C≡C–C~
Кумуленовая форма
~C=C=C=C=C~

$C_p \propto T$

Карбин

a_{CC} = 0.128 nm



C_{20}

d = 0.341 nm
a_{CC} = 0.142 nm

Графит

sp^3-орбитали
4σ: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$, $|2p_y\rangle$, $|2p_z\rangle$

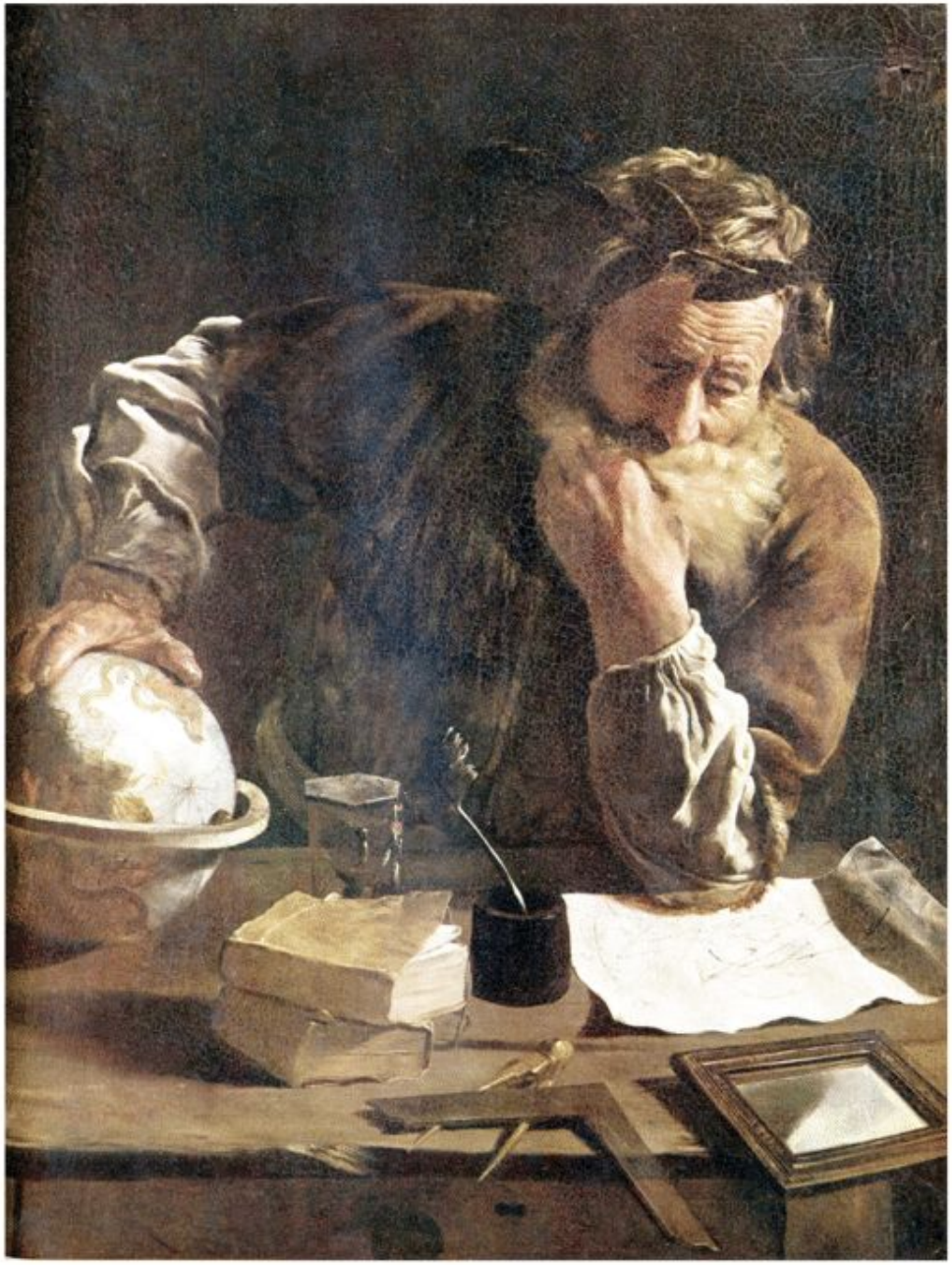
sp^2-орбитали
3σ: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$, $|2p_y\rangle$
π: $|2s\rangle$, $|2p_z\rangle$

sp-орбитали
2σ: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$
π: $|2s\rangle$, $|2p_y\rangle$
π: $|2s\rangle$, $|2p_z\rangle$

$C_p \propto T^2$

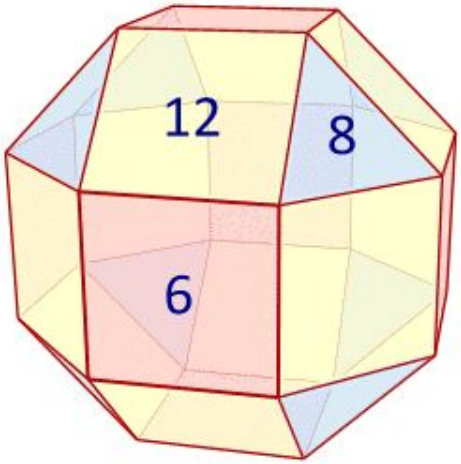
Гексагональный
Ромбоэдрический

В.В. Бражкин. *Межчастичное взаимодействие в конденсированных средах: элементы "более равные, чем другие".* УФН, **179** (4), 393 (2009).



Архимед (287 — 212 до н.э.)

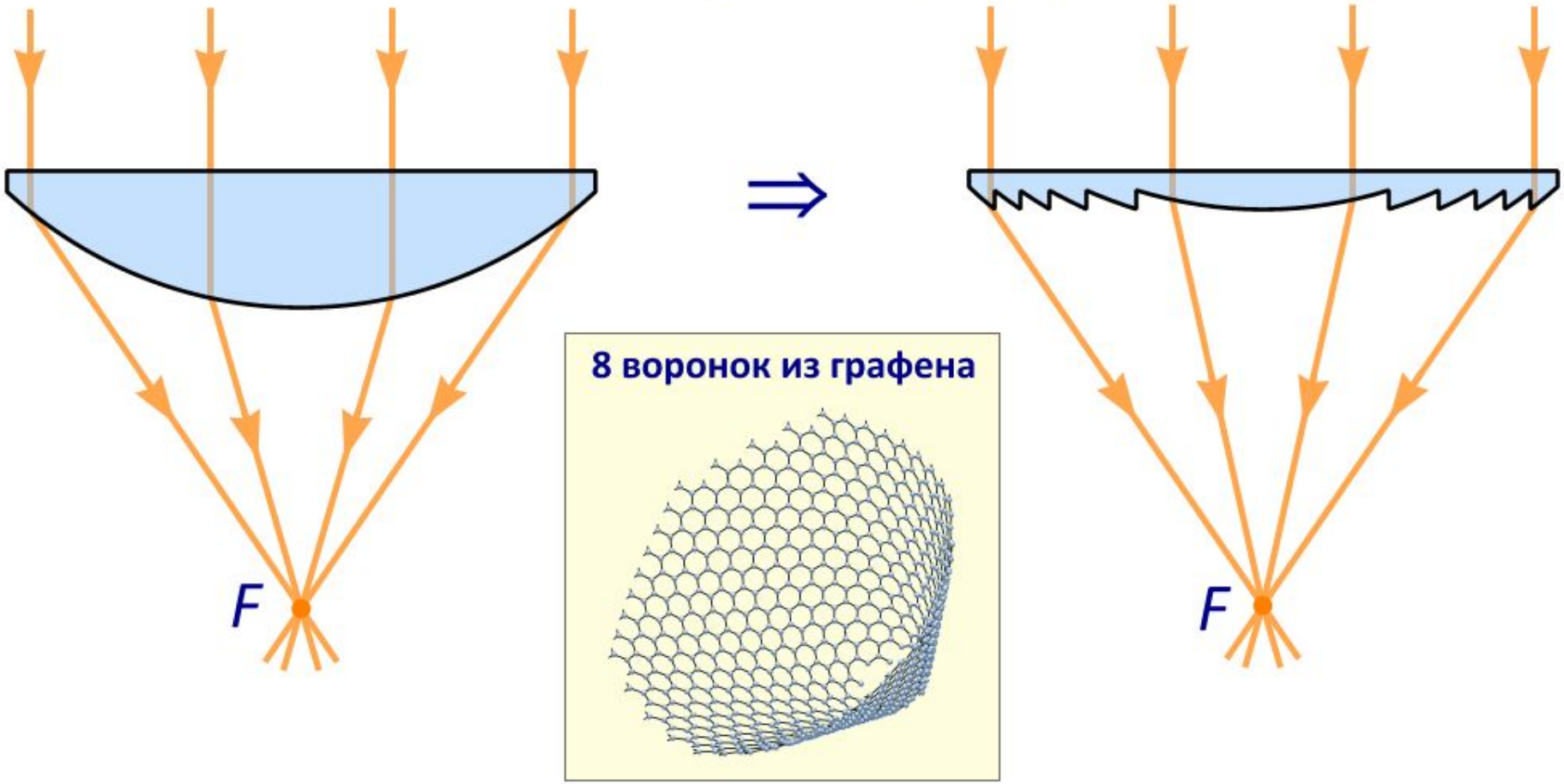
Национальная
библиотека Беларуси (2006 г.)



Ромбокубооктаэдр
(2 типа симметрии; 1957 г.)

0D ↔ 1D ↔ 2D ↔ 3D

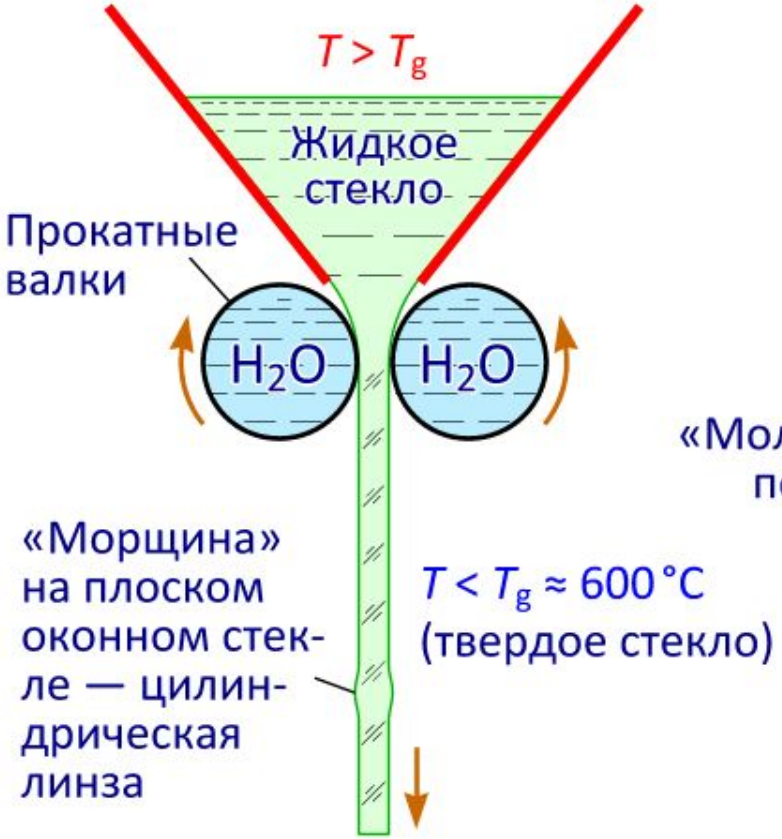
Линза Френеля (1823 г.)



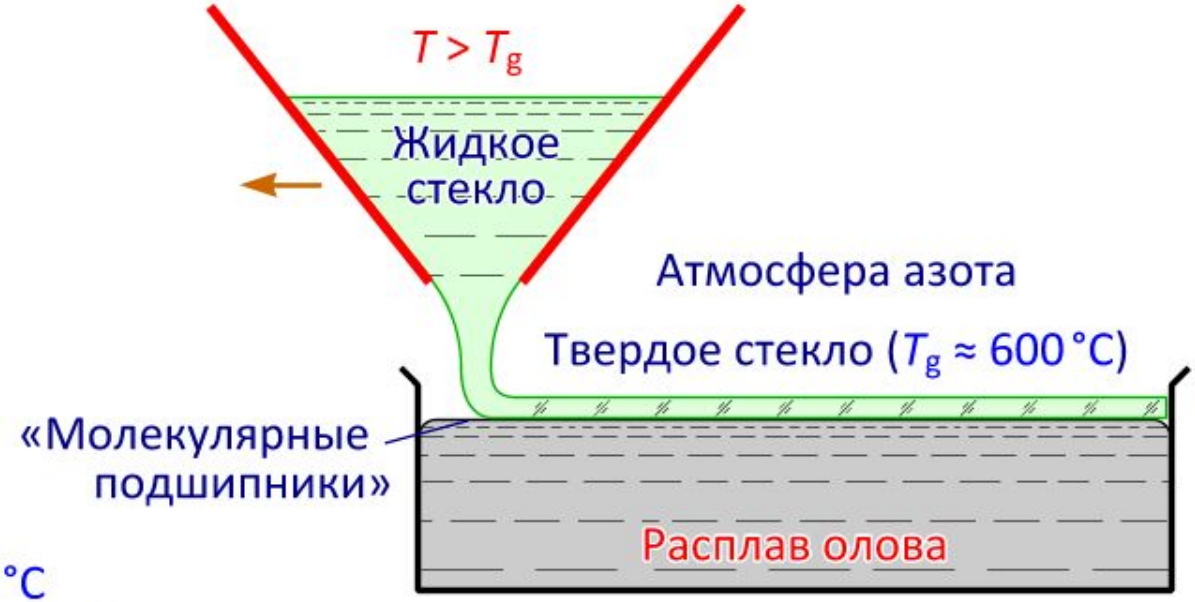
1. Р. Уинстон. *Неизображающая оптика.* В мире науки, № 5, 44–50 (1991).
1. N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, A.T. Vlassov. *Bistable states of defects in graphene.* Contributed Papers of VII Int. Conf. Plasma physics and plasma technology (PPPT-7), Minsk, Sept. 17–21, 2012: In 2 vols. / B.I. Stepanov Institute of Physics, NASB (Minsk: Kovcheg, 2012) Vol. II, P. 511–514.
2. Н.А. Поклонский. *Концентраторы солнечного света.* Энциклопедия для школьников и студентов. В 12 т. Т. 4. Мир техники / под общ. ред. Н.А. Поклонского (Минск: Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2012) 712 с.

Две технологии изготовления плоского стекла

1902 г. (Э. Фурко, Бельгия)



1952 г. (А. Пилкингтон, Англия)



$T_m = 232\,°C$, $T_b = 2430\,°C$

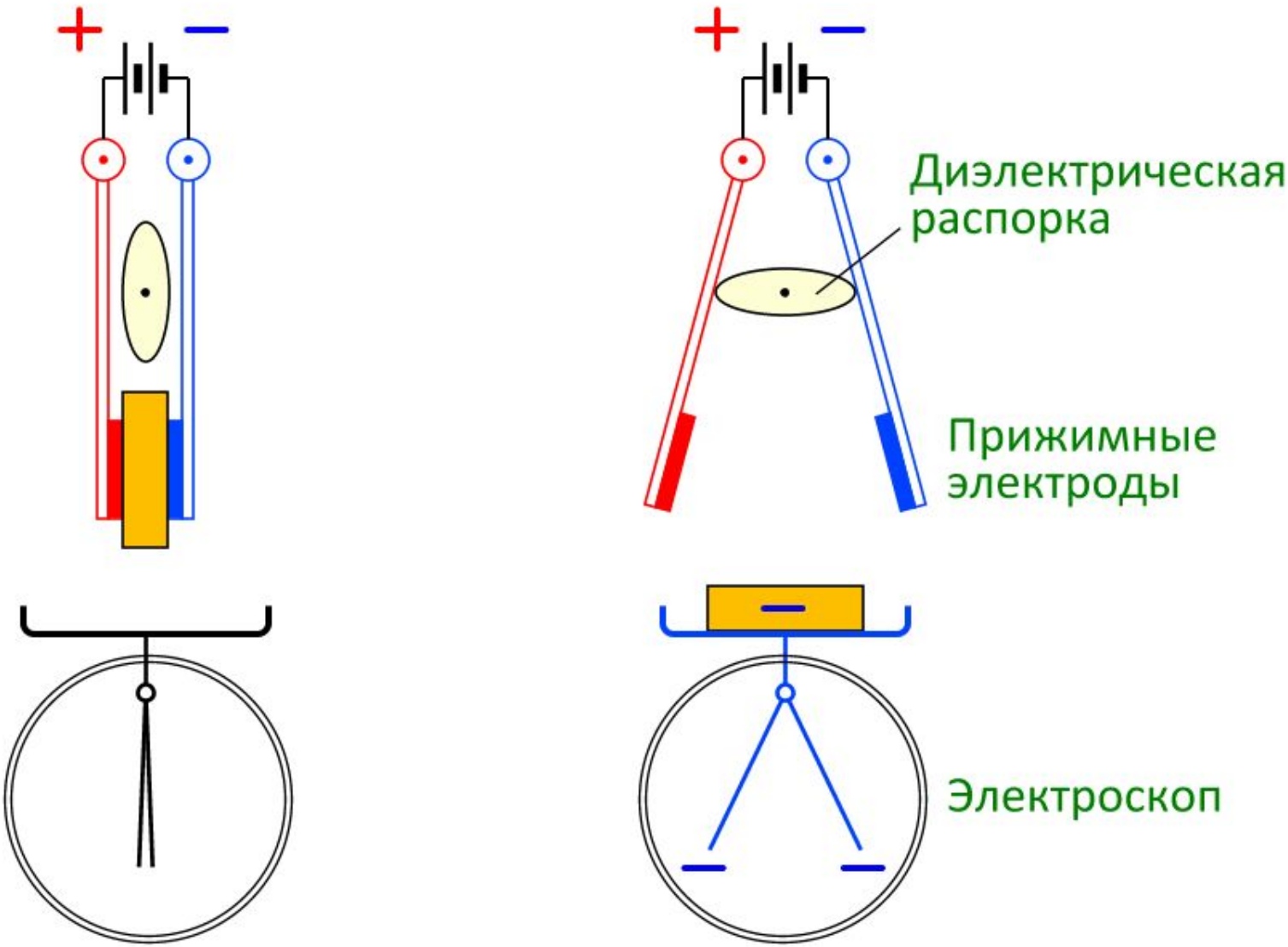
$T_b - T_m \approx 2200\,°C \Rightarrow$ Олово не парит!

«Термополированное стекло»

Чем медленнее охлаждается стекло, тем оно менее прозрачно, так как ближе к кристаллическому состоянию.
Чем ближе расположены атомы примесей в стеклянной матрице, тем сильнее эффект «отталкивания» их энергетических уровней.

Н. Мотт. *Электроны в стеклообразных материалах.* УФН, **127** (1), 41–50 (1979).

Инжекция электронов в диэлектрик



М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973) 416 с.

Ксерографический процесс

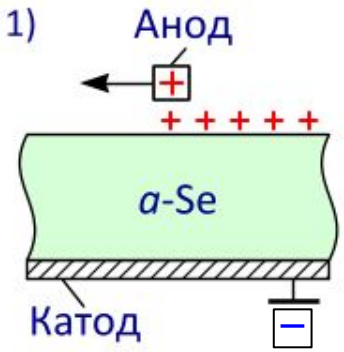
1) Положительно заряженный анод в виде нити движется в темноте параллельно поверхности *a*-Se и положительно заряжает её ионами воздуха посредством коронного разряда. При этом на катоде, на который нанесен слой *a*-Se, образуется равный по величине отрицательный заряд. В итоге ионы воздуха и катод создают внутри селенового стекла электростатическое поле (как в плоском заряженном конденсаторе).

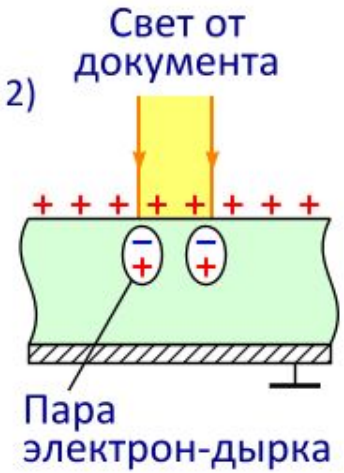
2) На поверхность *a*-Se проецируют оптическое изображение копируемого документа. Исходящие от светлых областей оригинала фотоны при поглощении в селеновом стекле создают как подвижные электроны, так и подвижные дырки.

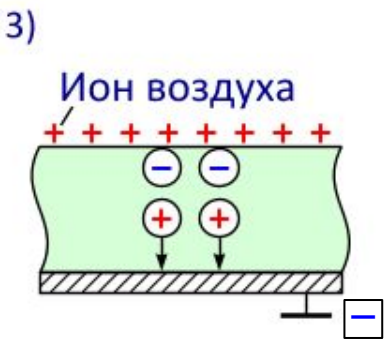
3) Под действием электростатического поля внутри слоя *a*-Se электроны дрейфуют к ионам воздуха на поверхности стекла и локально нейтрализуют их положительный заряд. В результате поверхность *a*-Se, на которую проецировалось изображение копируемого документа, становится электрически нейтральной там, где на оригинале была светлая область, и остается положительно заряженной там, где на оригинале была тёмная область. Дырки имеют положительный заряд, поэтому они дрейфуют к катоду и частично нейтрализуют его отрицательный заряд.

4) На слой *a*-Se наносят электрически нейтральный краситель в виде тонкого порошка. Частицы красителя электрически поляризуются и прилипают к положительно заряженным участкам поверхности селенового стекла.

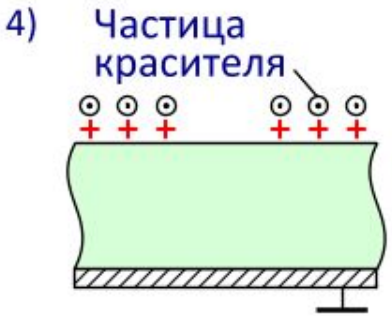
5) На стекло кладут лист бумаги. При втором прохождении анода краситель переполяризуется и переносится с *a*-Se на бумагу. Полученное на бумаге изображение закрепляют. Остаточные заряды на селеновом стекле и бумаге нейтрализуют.

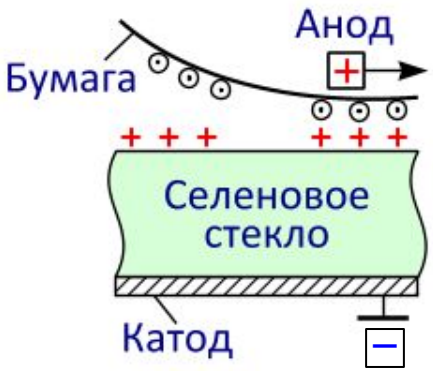




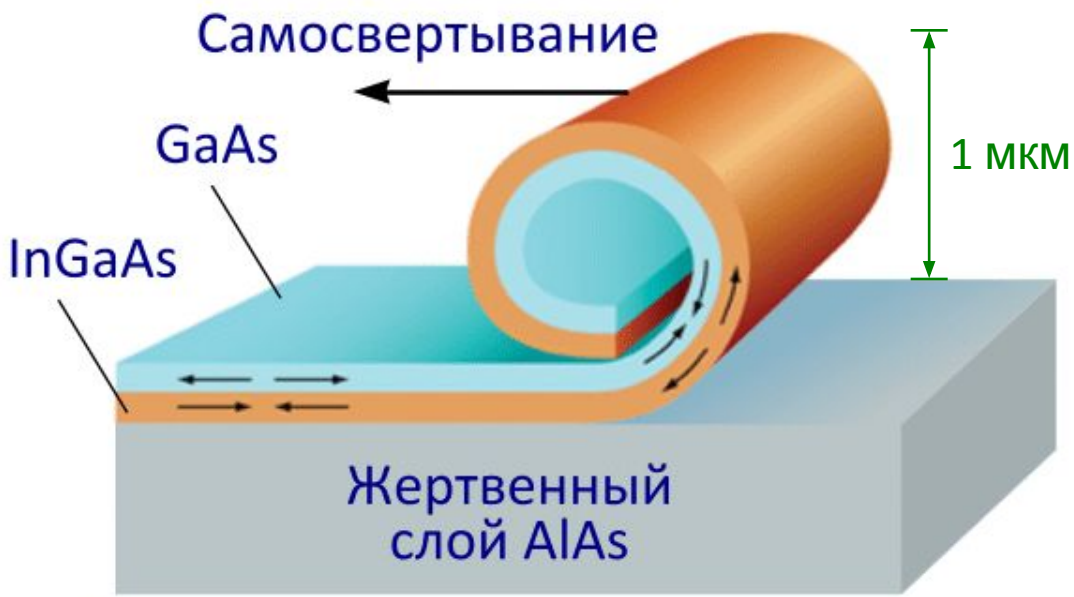


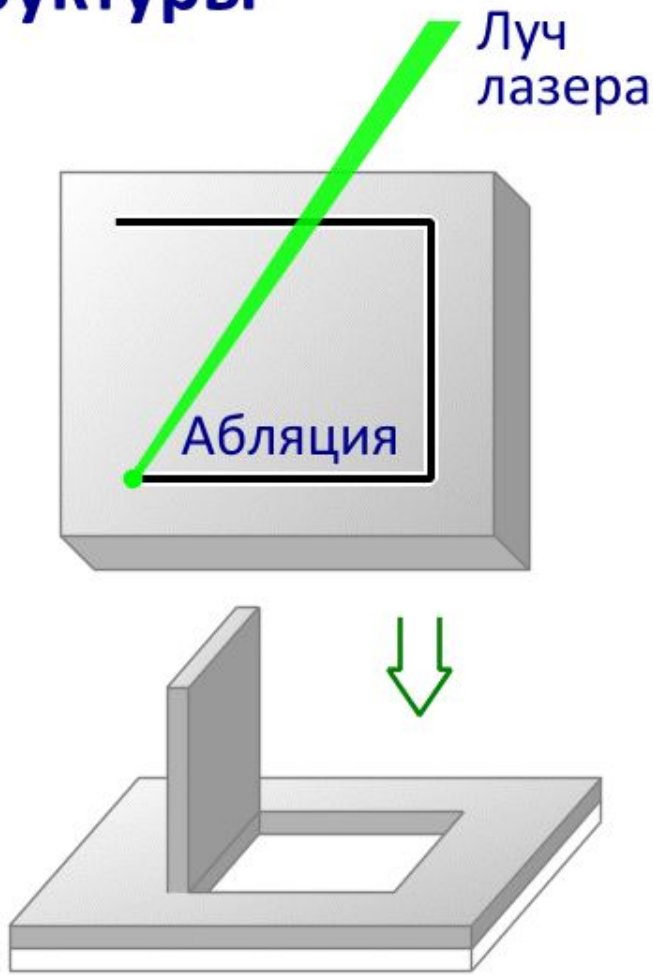
Ч. Карлсон (1938 г.)





Рулоны из молекулярно тонких слоев напряженной гетероструктуры

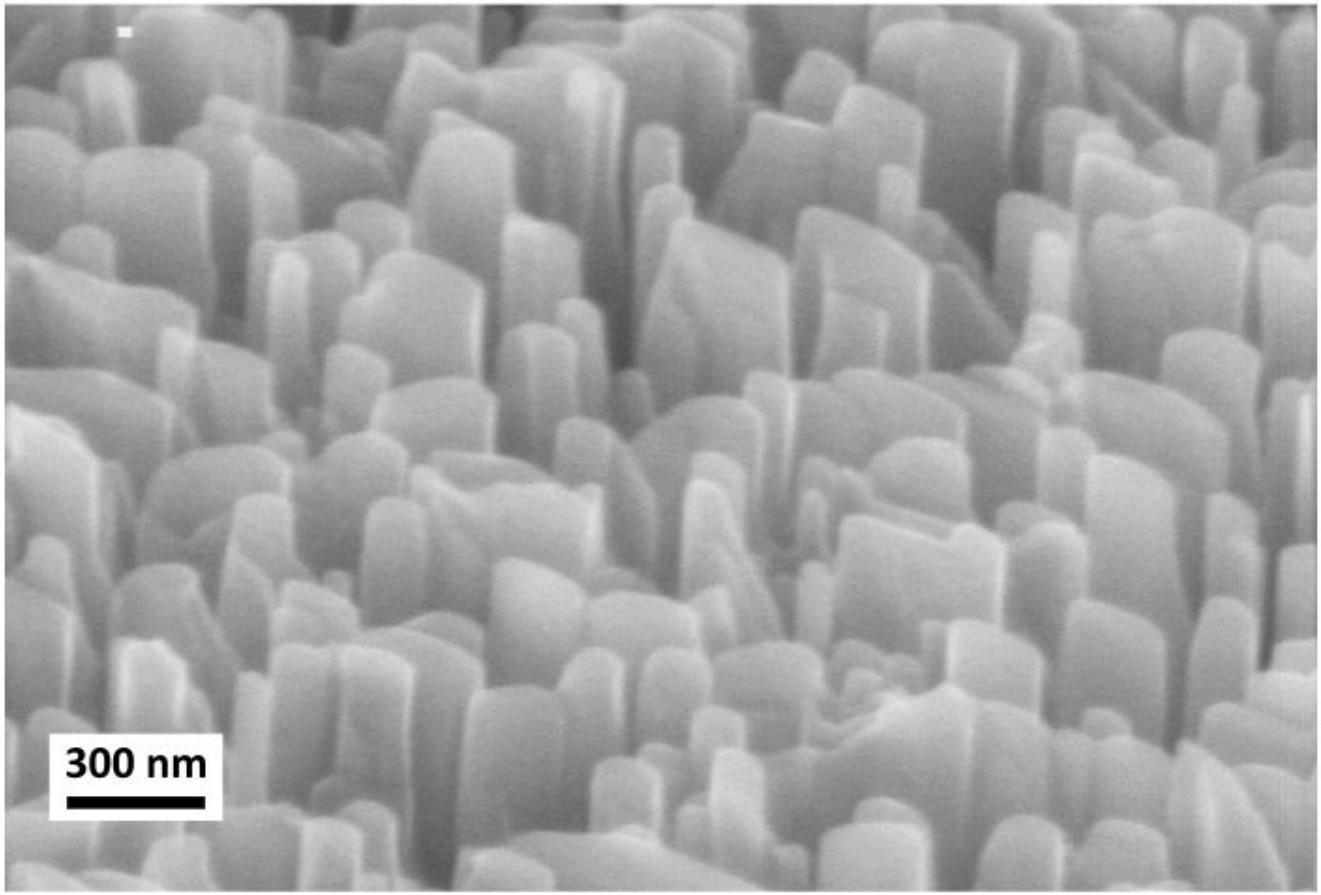




Диаметр рулона определяется:
1) толщиной бислоя,
2) отличиями параметров решетки и/или кристаллографической ориентации напряженных слоев

1. V.Ya. Prinz *et al*. *A technique for fabricating InGaAs/GaAs nanotubes of precisely controlled lengths*. Nanotechnology, **13** (2), 231 (2002).
2. A. Cho. *Pretty as you please, curling films turn themselves into nanodevices*. Science, **313**, 164 (2006).
3. S. Tongay, M. Lemaitre, J. Fridmann, A.R Hebard, B.P. Gila, B.R. Appleton. *Drawing graphene nanoribbons on SiC by ion implantation*. Appl. Phys. Lett., **100**, 073501 (2012).

Иррациональные числа на плоскости



Наноколонны из алмаза на кремнии

(Электронная микроскопия)

1. Л.В. Келдыш. *Таммовские состояния и физика поверхности твердого тела.* Природа, № 9, 17–33 (1985).
2. Р.А. Хмельницкий. *Перспективы выращивания монокристаллического алмаза большого*

Витрувий (I в. до н.э.):
черная сажа в живописи и инженерном деле

Белая сажа — тонкий порошок SiO_2 (90%) + Al_2O_3 (10%)

Графит/Графен

Натуральный графит — минерал серого цвета с металлическим блеском (Англия, 1564 г.)

«*Plumbago*» (подобный свинцу)
Lead — карандашный грифель

Карандаш — от тюркского «*кара*» (черный) + «*даш*» (камень)
Аловак — от польск. *ołów* (свинец)

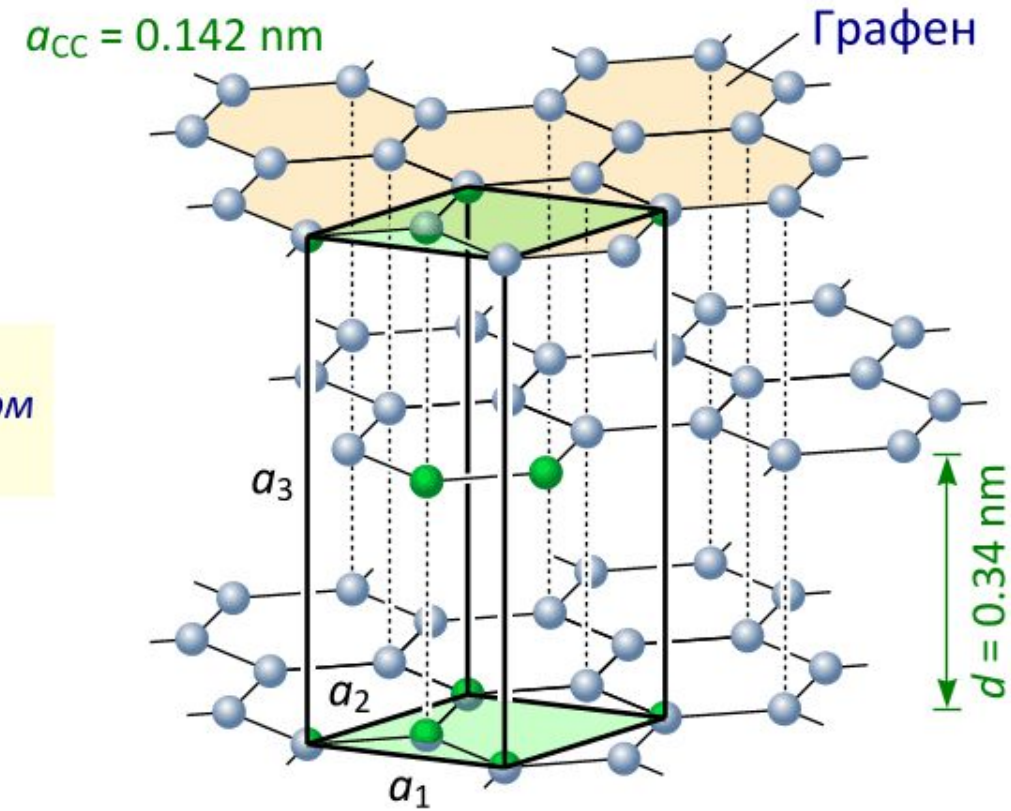
Графит (по В. Далю):
«ископаемое, из которого делается так называемый свинцовый карандаш»

К. Шееле (1779 г.): углерод
А. Вернер (1789 г.): *графит*

Никола Ж. Конте (1795 г.):
обожженная смесь молотого графита с глиной — грифельный карандаш

$N_{graphite} = 1.14 \cdot 10^{23}$ cm^{-3}

$N_{Graphene} = 3.81 \cdot 10^{15}$ cm^{-2}



Гексагональный графит (по Дж. Берналу)

Элементарная ячейка — призма: содержит 4 атома,

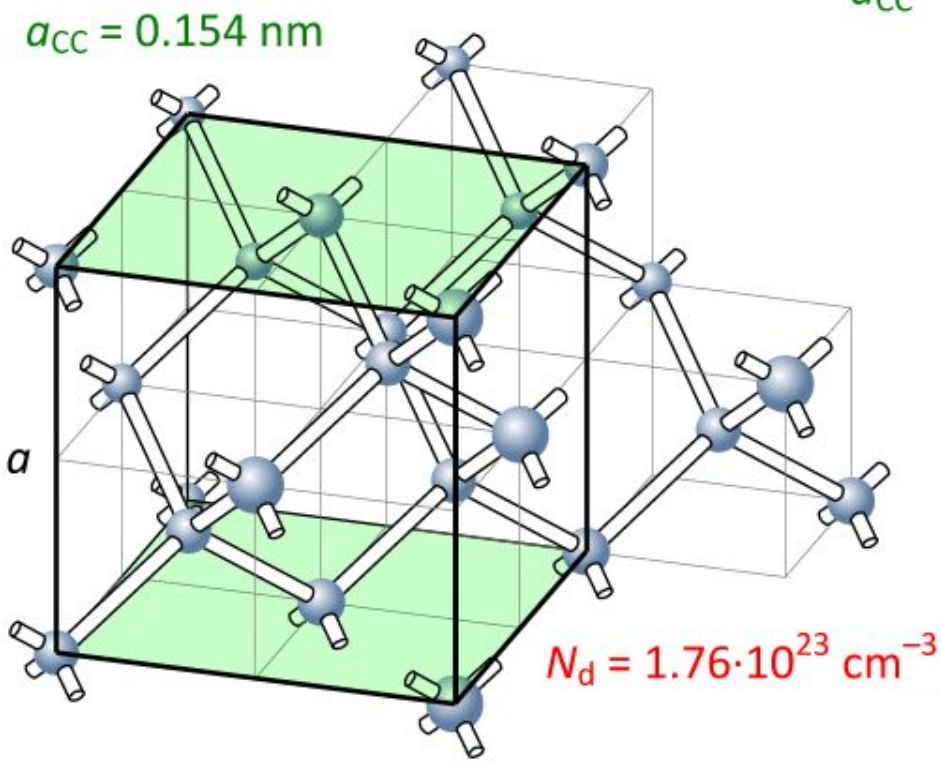
$a_1 = a_2 = \sqrt{3} a_{CC} = 0.2461$ nm,

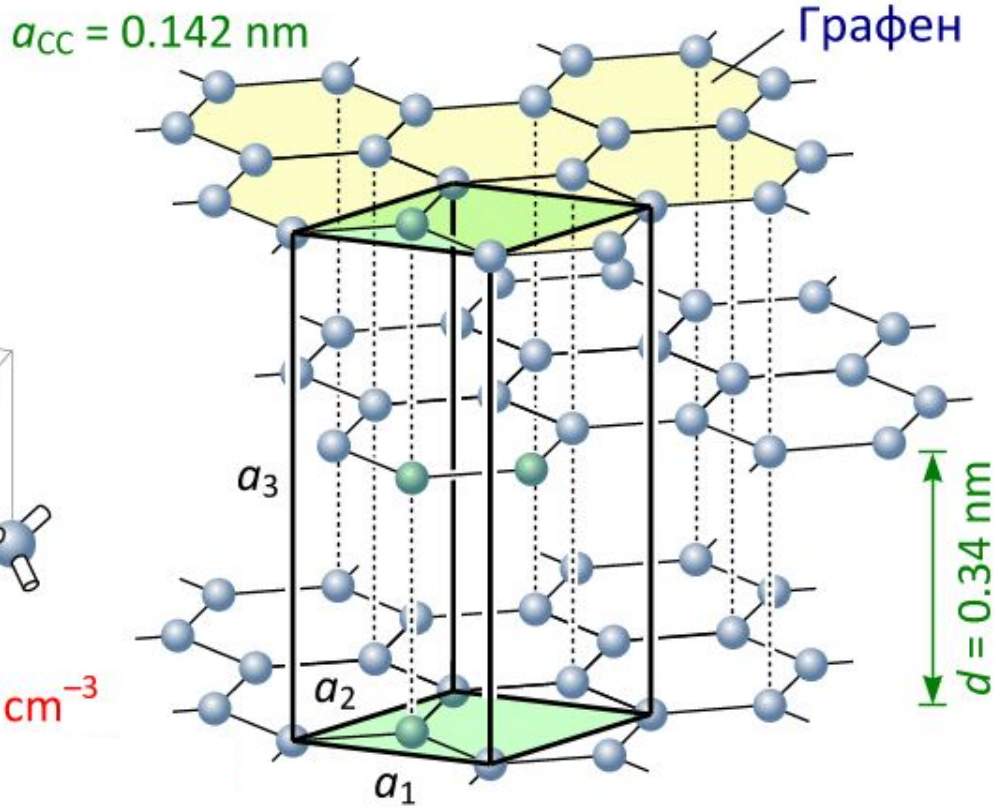
$a_3 = 2d = 0.6708$ nm

Почему скользит графит?

Кристаллические решетки алмаза и графита

Алмаз (араб.) — *твердейший*
Адамас (греч.) — *непобедимый*
Diamond (англ.), дыямант (бел.)





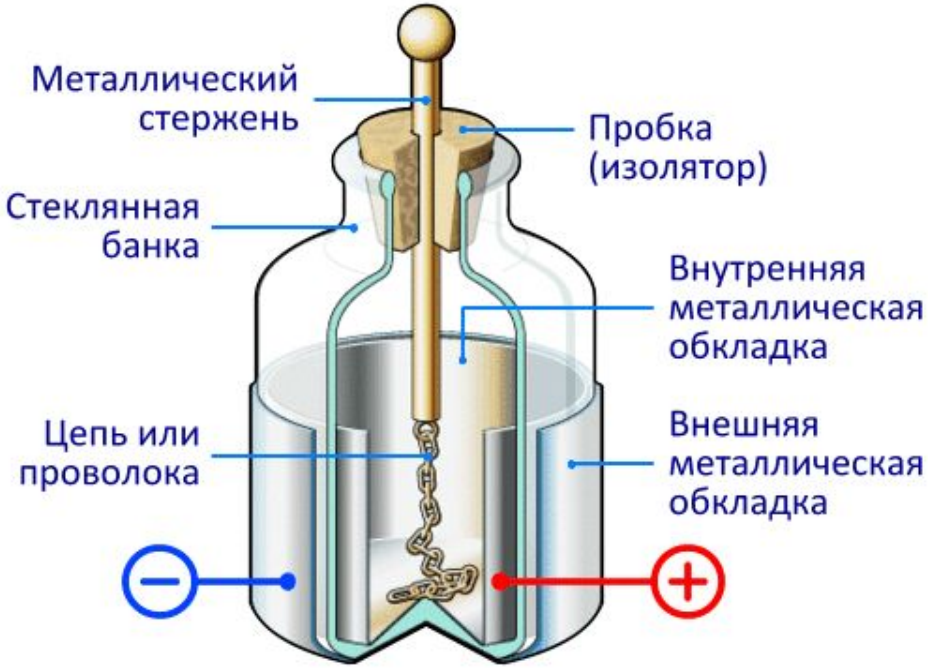
Кубический алмаз

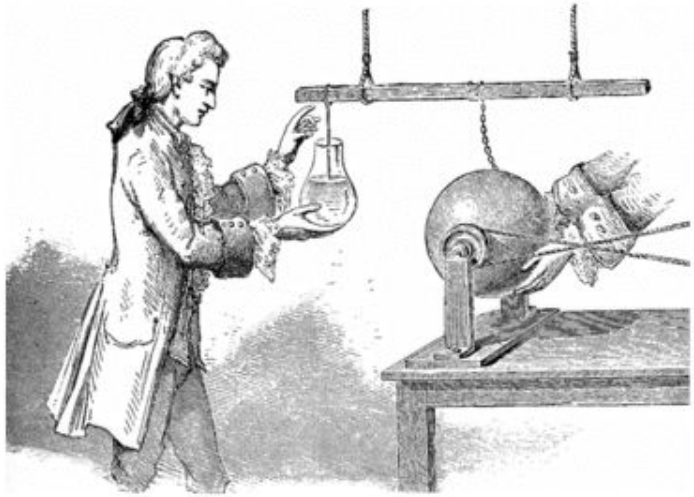
Элементарная ячейка — куб:
содержит 8 атомов,
постоянная решетки a = 0.357 nm,
$a_{CC} = a\sqrt{3}/4$ = 0.154 nm

Гексагональный графит

$N_g = 1.14 \cdot 10^{23}$ cm^{-3}

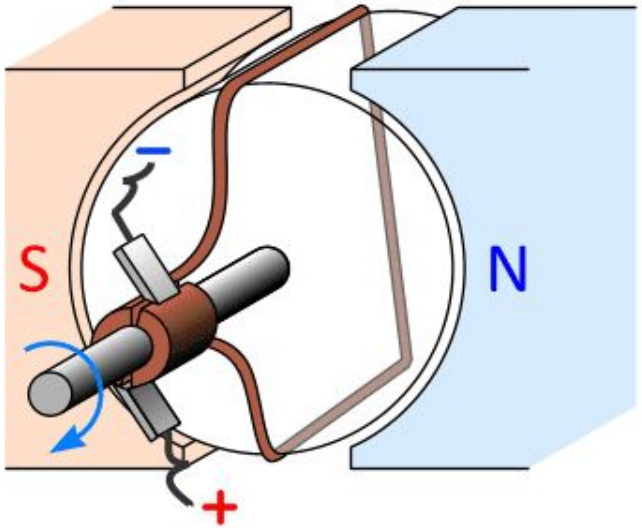
Лейденская банка

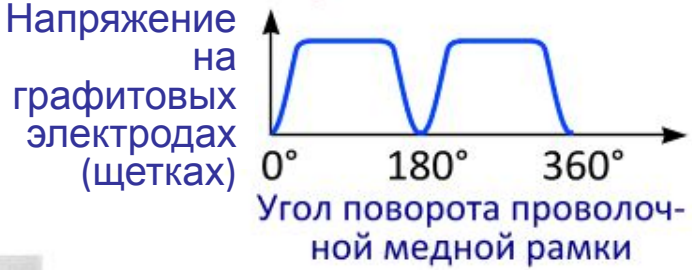




Питер ван Мушенбрук (Лейден, 1745)

Динамо-машина





Аньош Иштван Йедлик (Будапешт, 1827)

Почему скользит графит?

1. Согласно У.Л. Брэггу (1910 гг.) графит скользит из-за того, что атомы углерода связаны внутри графитового слоя сильной σ-связью (длиной 0.14 nm), а графитовые слои связаны между собой слабой π-связью (0.34 nm).

2. Эксперимент (1950 гг.): в вакууме или при высокой температуре фрикционные свойства графита хуже, чем у железа.

3. Слои графита (графены) скользят по примесным атомам (молекулам), абсорбированным между графитовыми плоскостями в приповерхностной области.

Только присутствие в атмосфере молекул, склонных к абсорбции графитом, делает его вполне пригодным смазочным материалом.

Березин Г.И., Васильев Ю.Н., Дубинин М.М. *Адсорбционная модель трения графита.* Доклады АН СССР, **292** (3), 644 (1987).

Предыстория графена

Графен, каким его вероятно видел B.C. Brodie

On the atomic weight of graphite.

Phil. Trans. R. Soc. Lond., **149**, 249 (1859).

Окисленный азотной кислотой графит, растворяясь в воде, образует желтую взвесь графеновых чешуек на дне пробирки

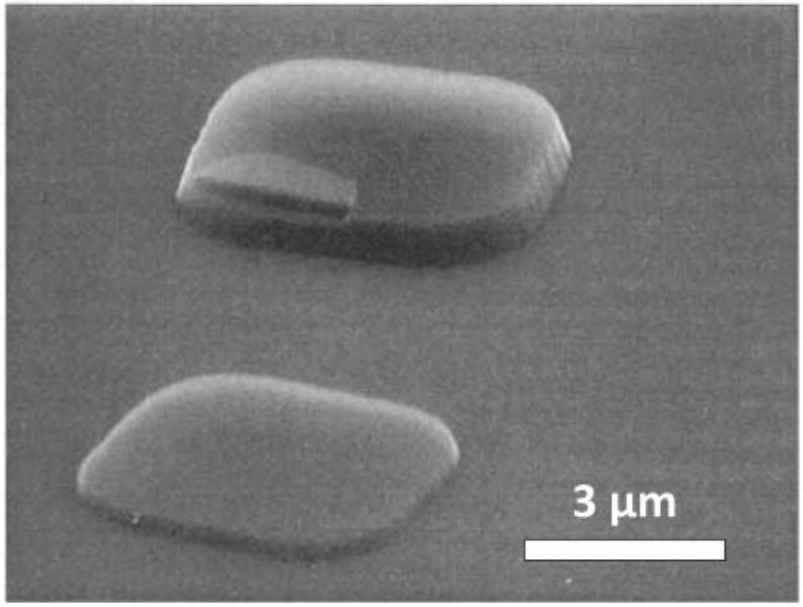
SEM-изображение тонких графитовых пластинок на инженерной поверхности Si

X. Lu, M. Yu, H. Huang, R.S. Ruoff.

Tailoring graphite with the goal of achieving single sheets.

Nanotechnology, **10** (3), 269 (1999).

1. Пиролитический графит травился через трафарет в кислородной плазме. 2. Формировались графитовые островки. 3. Кремниевой пластиной терли графит, при этом сколотые с островков пластинки переносились на кремний



Nobel Prize in Physics 2010: *For groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene*

А.К. Гейм

К.С. Новосёлов

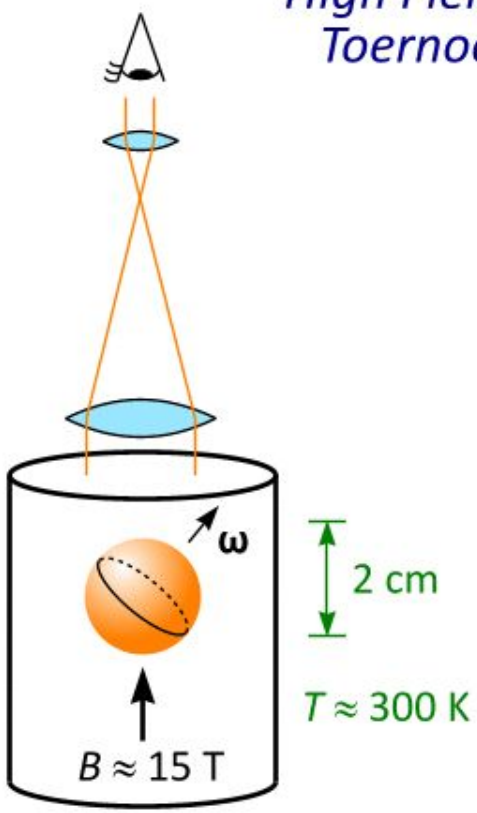
А.К. Гейм. *Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену.* УФН, **181** (12), 1284 (2011).
К.С. Новоселов. *Графен: материалы Флатландии.* УФН, **181** (12), 1299 (2011)

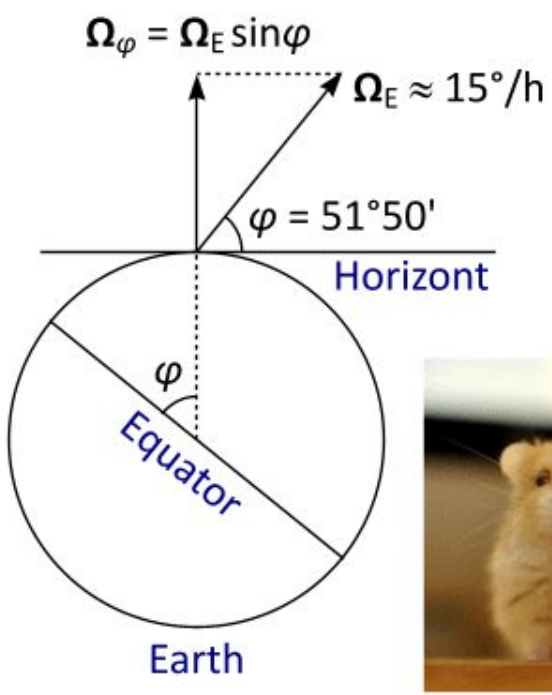
Physica B, **294–295**, 736–739 (2001)

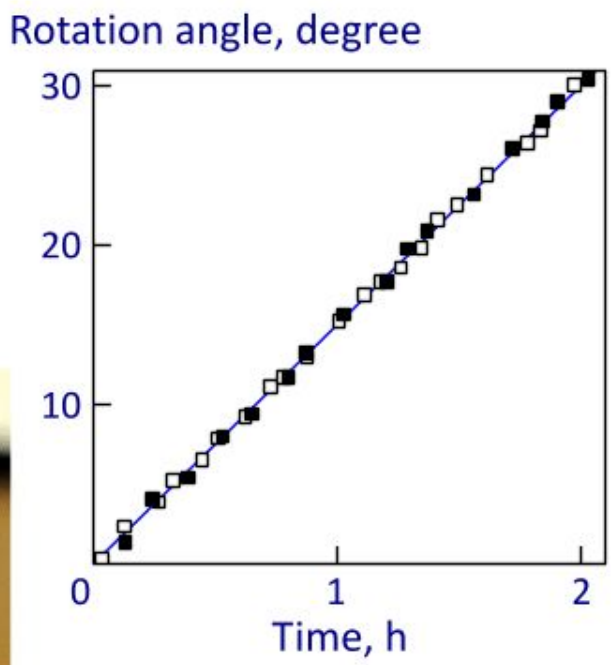
Detection of earth rotation with a diamagnetically levitating gyroscope

A.K. Geim, H.A.M.S. ter Tisha

High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen, Toernooiveld 1, 6525ED Nijmegen, The Netherlands

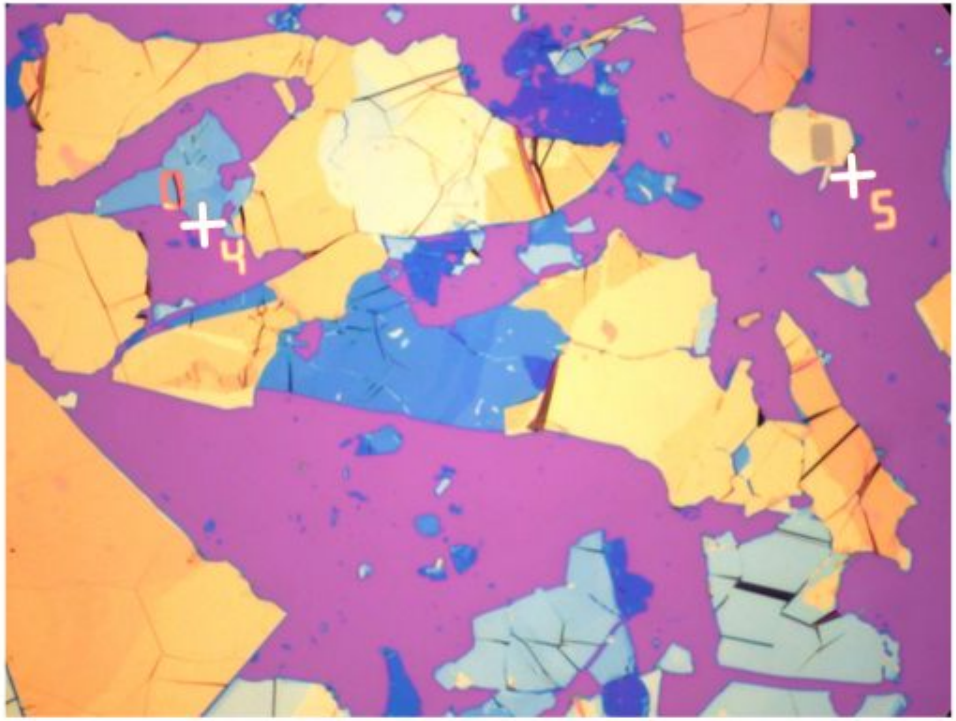






Dirk ter Haar. *Elements of Hamiltonian Mechanics* (Pergamon Press, Oxford, 1971) 209 p.

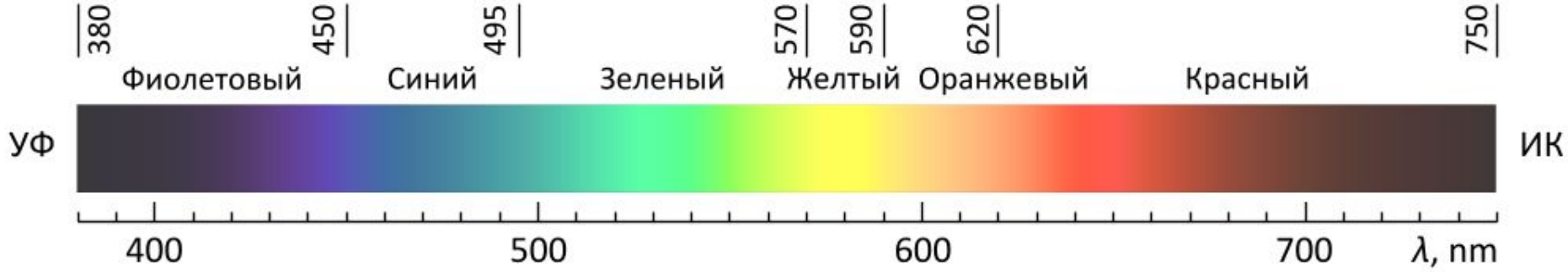
Микромеханическое расслоение графита



Тонкие графитовые чешуйки на поверхности пластины Si/SiO_2 (слой SiO_2 толщиной 300 nm фиолетового цвета).

Разные цвета отвечают чешуйкам разной толщины, от ≈ 100 nm (бледно-желтые) до нескольких нанометров (наиболее близкие к фиолетовому).

Масштаб задан расстоянием между литографическими отметками (200 μm)



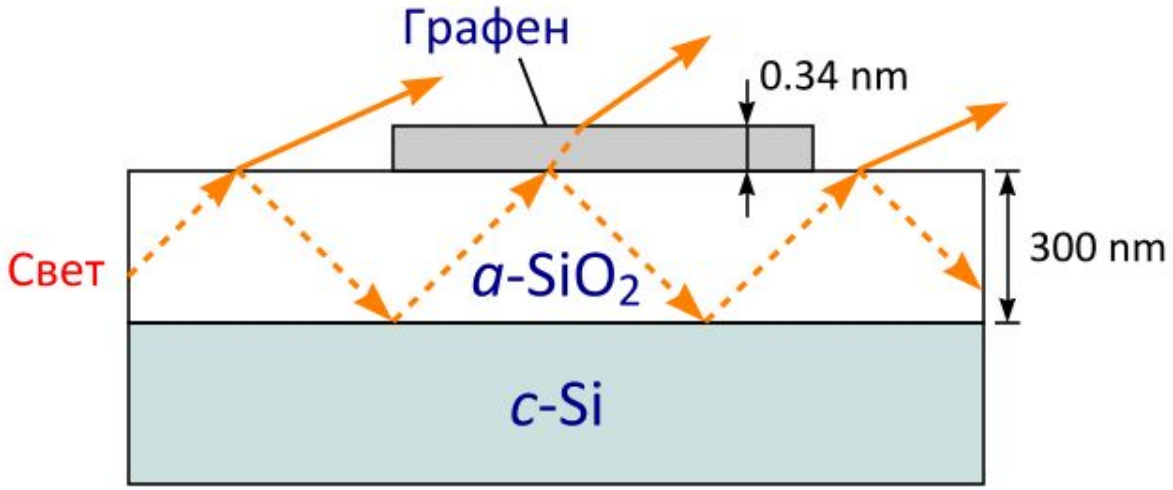
А.К. Гейм. *Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену.* УФН, **181** (12), 1284 (2011).
К.С. Новоселов. *Графен: материалы Флатландии.* УФН, **181** (12), 1299 (2011)

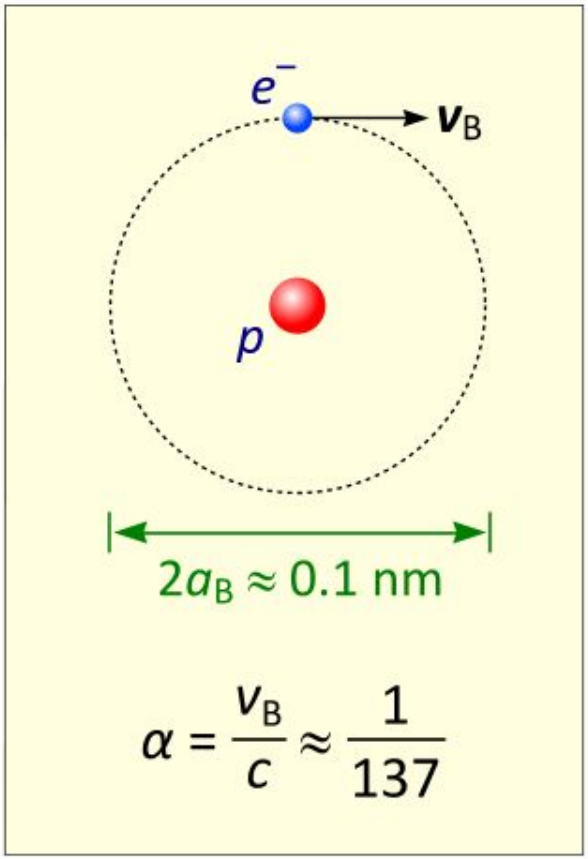
Распространение светового пучка в тонком слое диоксида кремния, на котором находится чешуйка графита

Пропускание видимого света графеном ($\alpha \approx 1/137$)

$$T = \left(1 + \frac{e^2}{8\varepsilon_0 \hbar c}\right)^{-2} \approx 1 - \pi\alpha = 97.7\%$$

"Что играет для этой задачи роль атома водорода?"
Э. Ферми

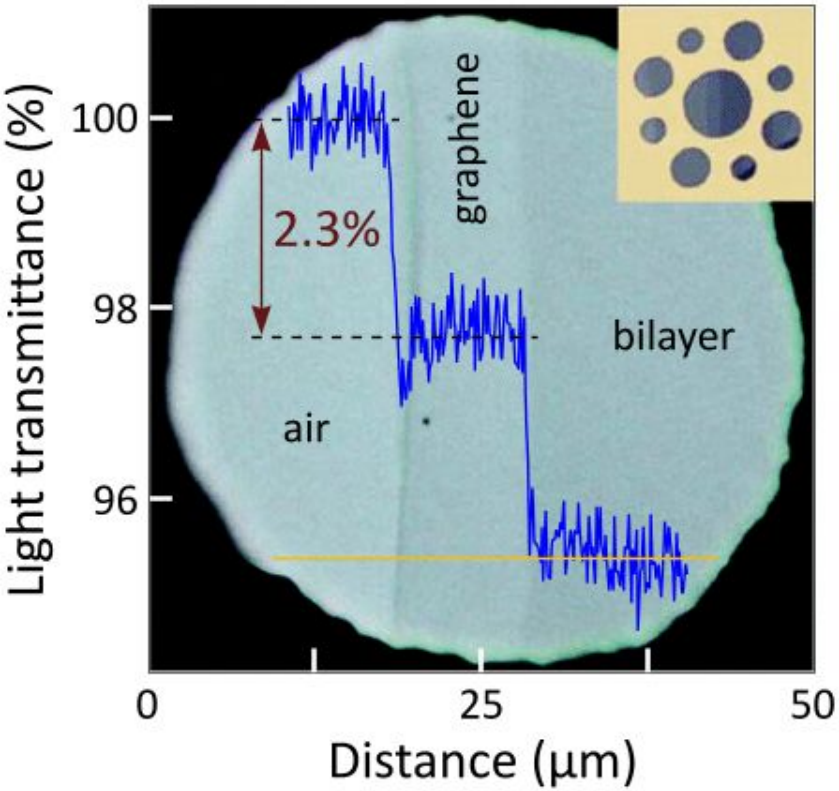


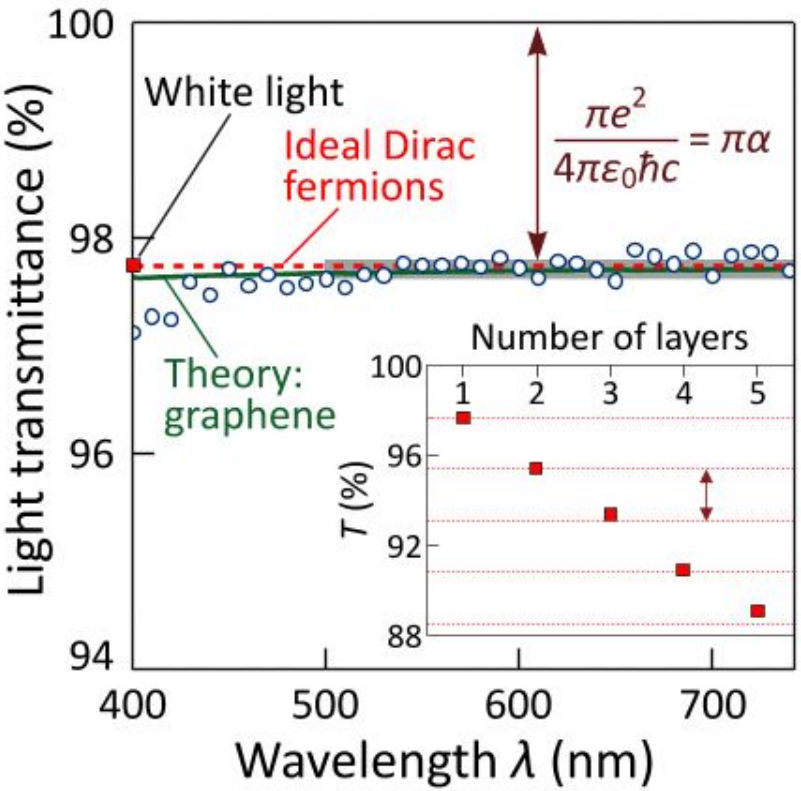


Чешуйка изменяет коэффициент отражения света от границы "аморфный диоксид кремния – воздух" и создает фазовый контраст (до 15%), который позволяет увидеть невооруженным глазом даже однослойный графит — графен

K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov. *Electric field effect in atomically thin carbon films.* Science, **306** (5696), 666–669 (2004).

Прозрачность графена определяется постоянной тонкой структуры





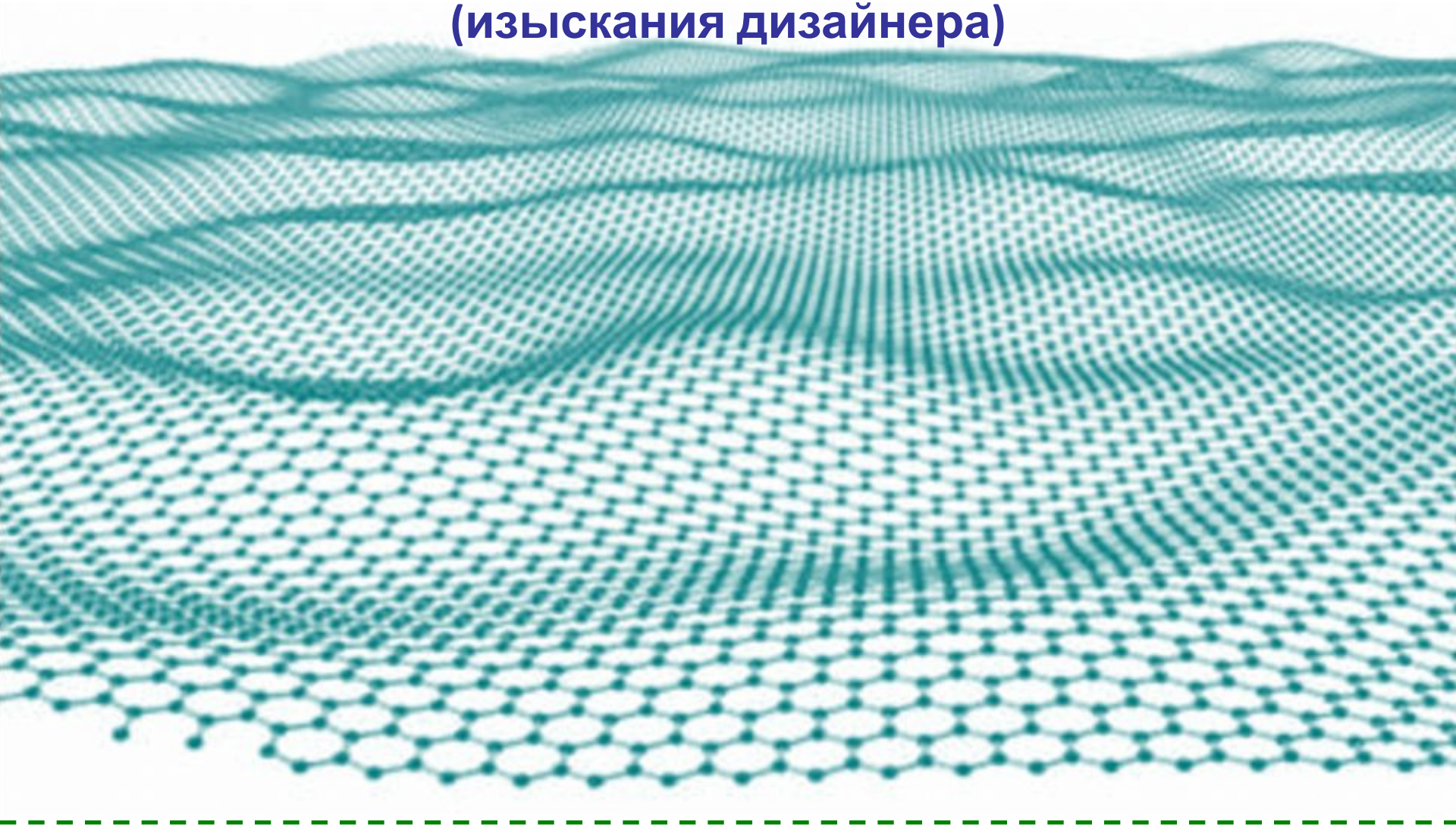
$$1 - T \approx \nu\pi\alpha$$

T — коэффициент пропускания света,
ν — число слоев графена,
$\alpha = e^2/(4\pi\varepsilon_0\hbar c) \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры

R.R. Nair, P. Blake, A.N. Grigorenko, K.S. Novoselov, T.J. Booth, T. Stauber, N.M.R. Peres, A.K. Geim. *Fine structure defines visual transparency of graphene.* Science, **320** (5881), 1308 (2008).

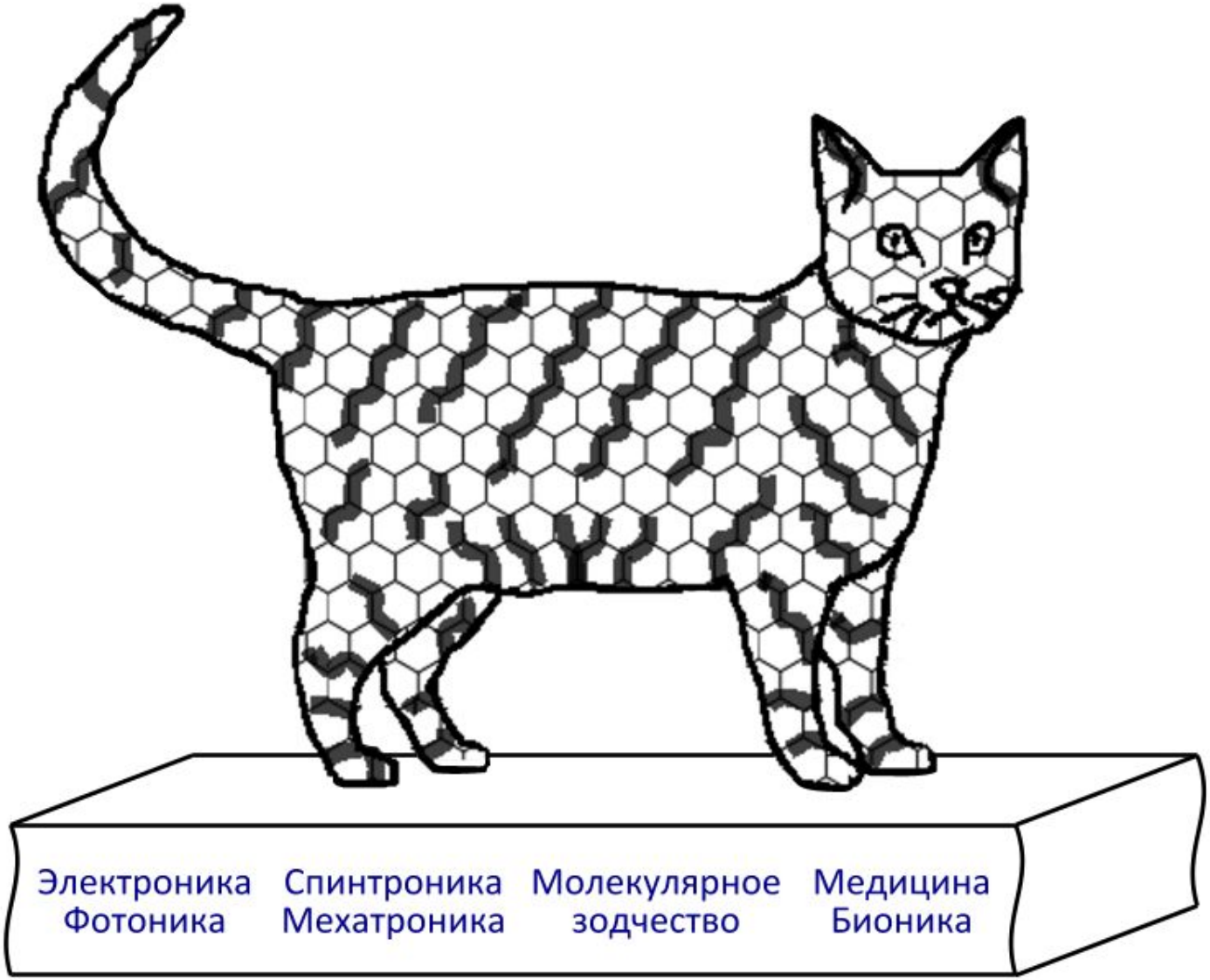
Бесконечно простирающийся мотив из атомов углерода

(изыскания дизайнера)



J.C. Meyer, A.K. Geim, M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov, T.J. Booth, S. Roth.
The structure of suspended graphene sheets. Nature, **446** (7131), 60–63 (2007).

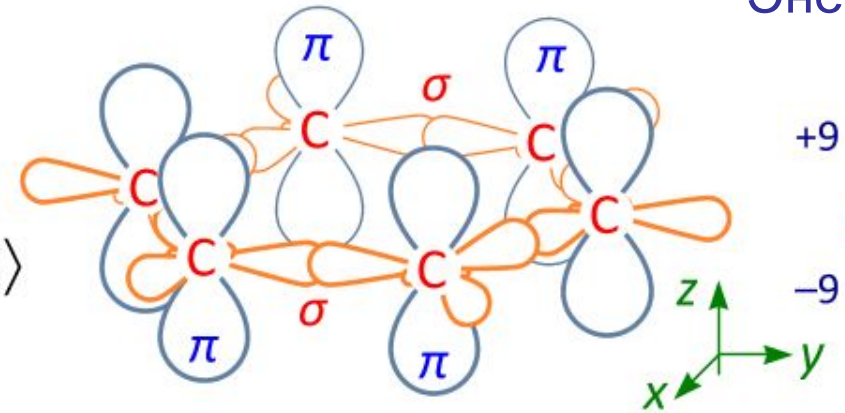
Tabby (муар из графена) — вереница воспоминаний

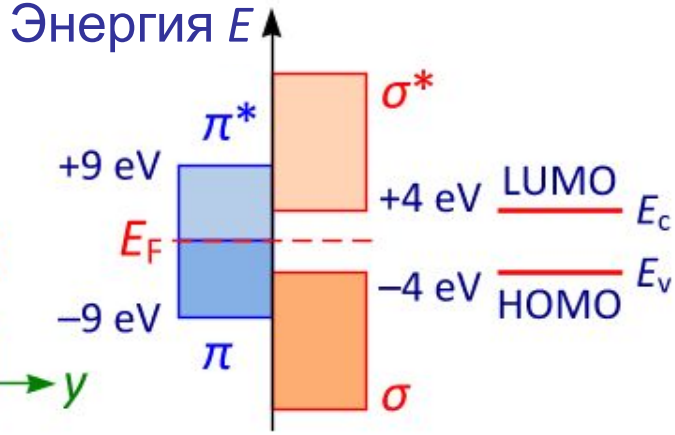


Энергетика химических связей в графене

a_{CC} = 0.142 nm

σ: $|2s\rangle$, $|2p_x\rangle$, $|2p_y\rangle$
π: $|2s\rangle$, $|2p_z\rangle$



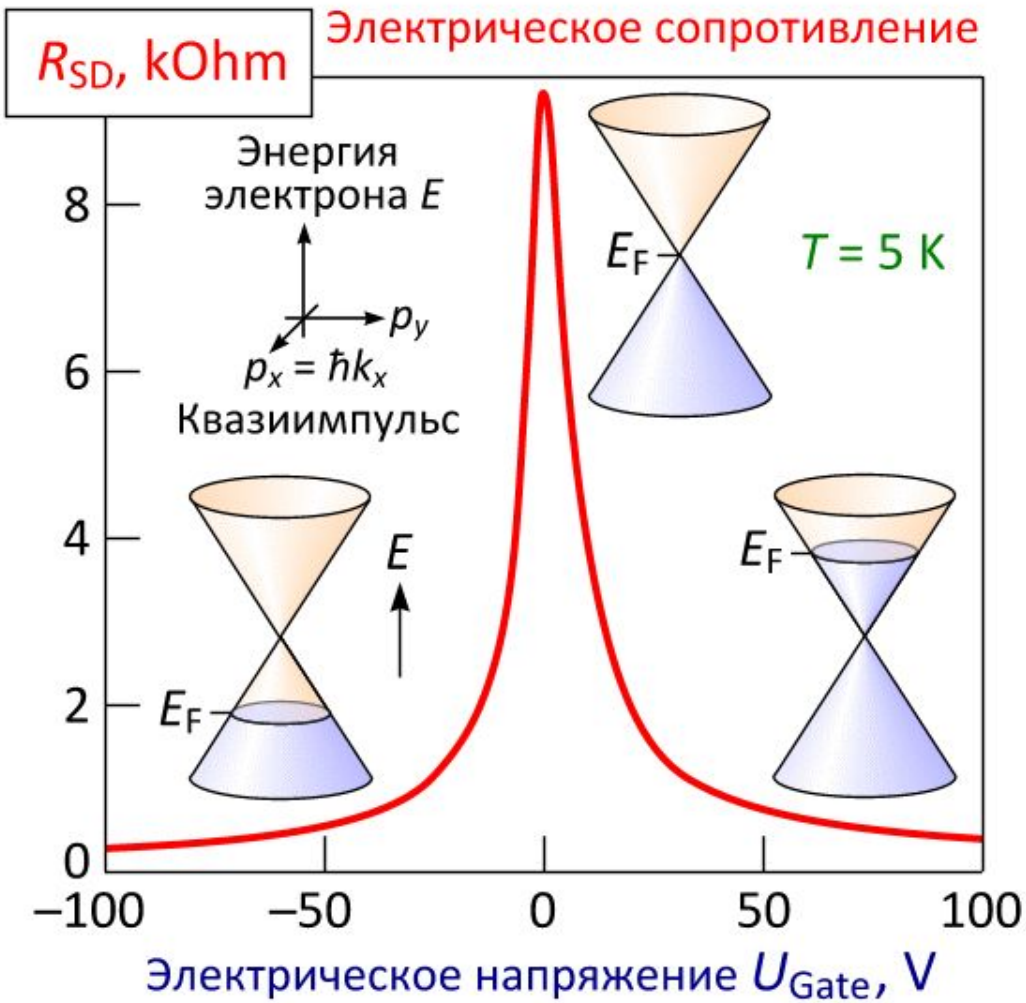


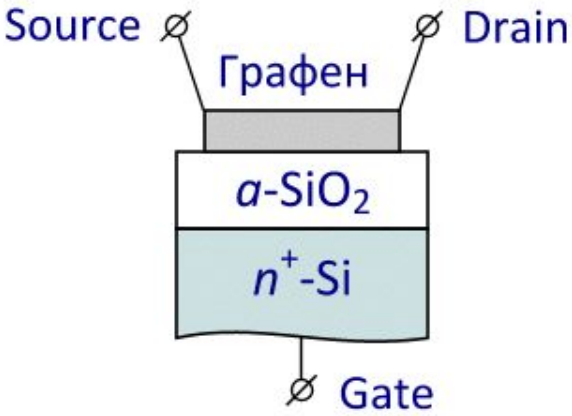
#) Четыре валентных орбитали атома углерода: $2s$, $2p_x$, $2p_y$ и $2p_z$. Орбитали s, p_x и p_y образуют лежащие в графеновой плоскости σ- (связывающие или занятые) и σ^*- (антисвязывающие или незанятые) орбитали, четные по отношению к отражению в плоскости xy. Три σ-связи между атомами углерода в плоскости xy образуют гексагональную решетку.

##) Орбиталь p_z направлена вдоль оси z, нечетна по отношению к отражению в плоскости xy и не взаимодействует с σ-орбиталями. Взаимодействие между соседними p_z-орбиталями приводит к образованию делокализованных π- (связывающей) и π^*- (антисвязывающей) орбиталей. π-Связи перпендикулярны плоскости графена и отвечают за взаимодействие между слоями (графенами) в графите.

A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres, K.S. Novoselov, A.K. Geim.
The electronic properties of graphene. Rev. Mod. Phys., **81** (1), 109–162 (2009).

Графеновый полевой транзистор:
песочные часы в пространстве квазиимпульса $p = \hbar k$





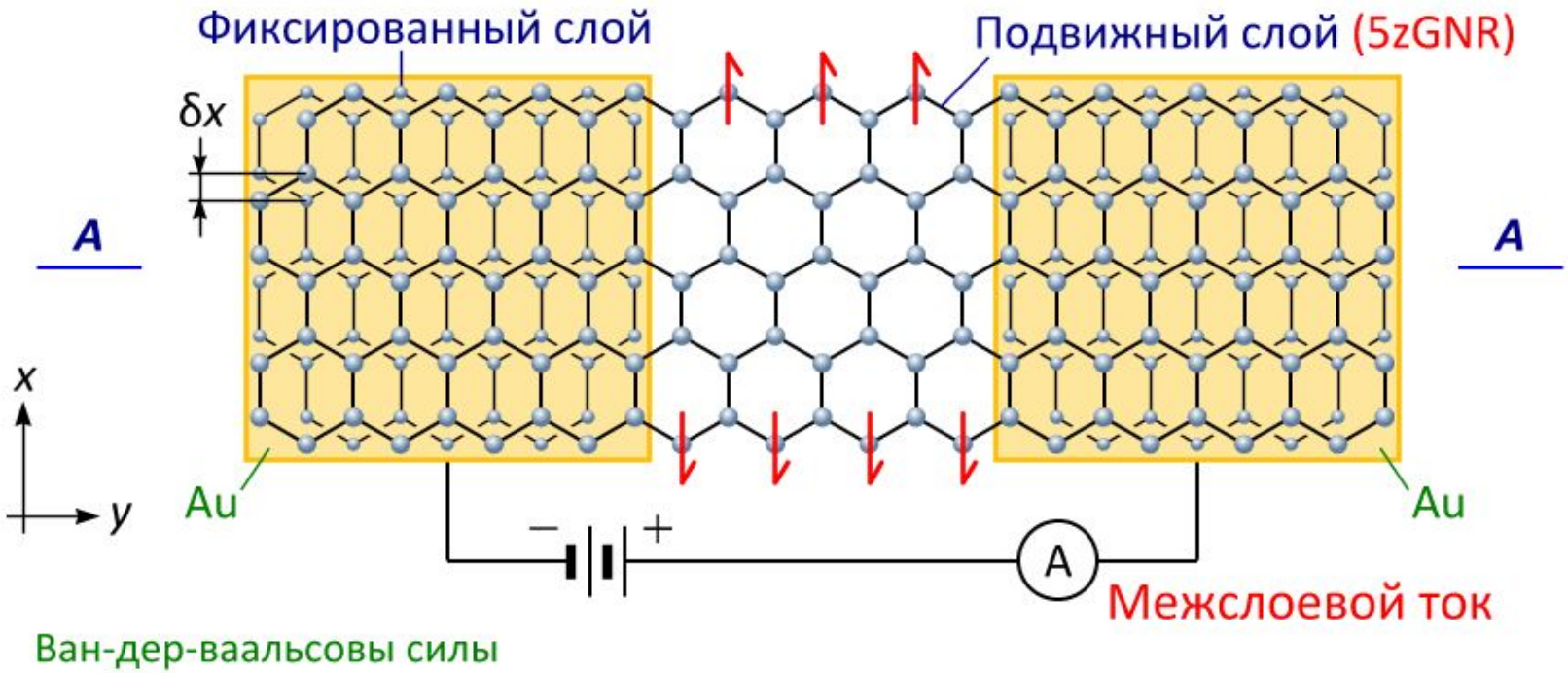
K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov. *Electric field in atomically thin carbon films.* Science, **306** (5696), 666–669 (2004).

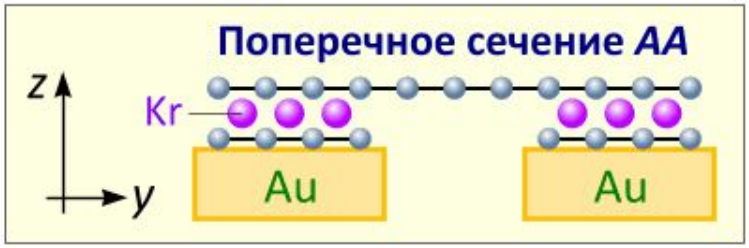
Qubit piano
Klein tunneling

P. Recher, B. Trauzettel. *Quantum dots and spin qubits in graphene.* Nanotechnology, **21**, 302001 (2010).

Нанодинамометр на основе бислоя графена

Квантово-химический расчет + Туннельный гамильтониан Бардина



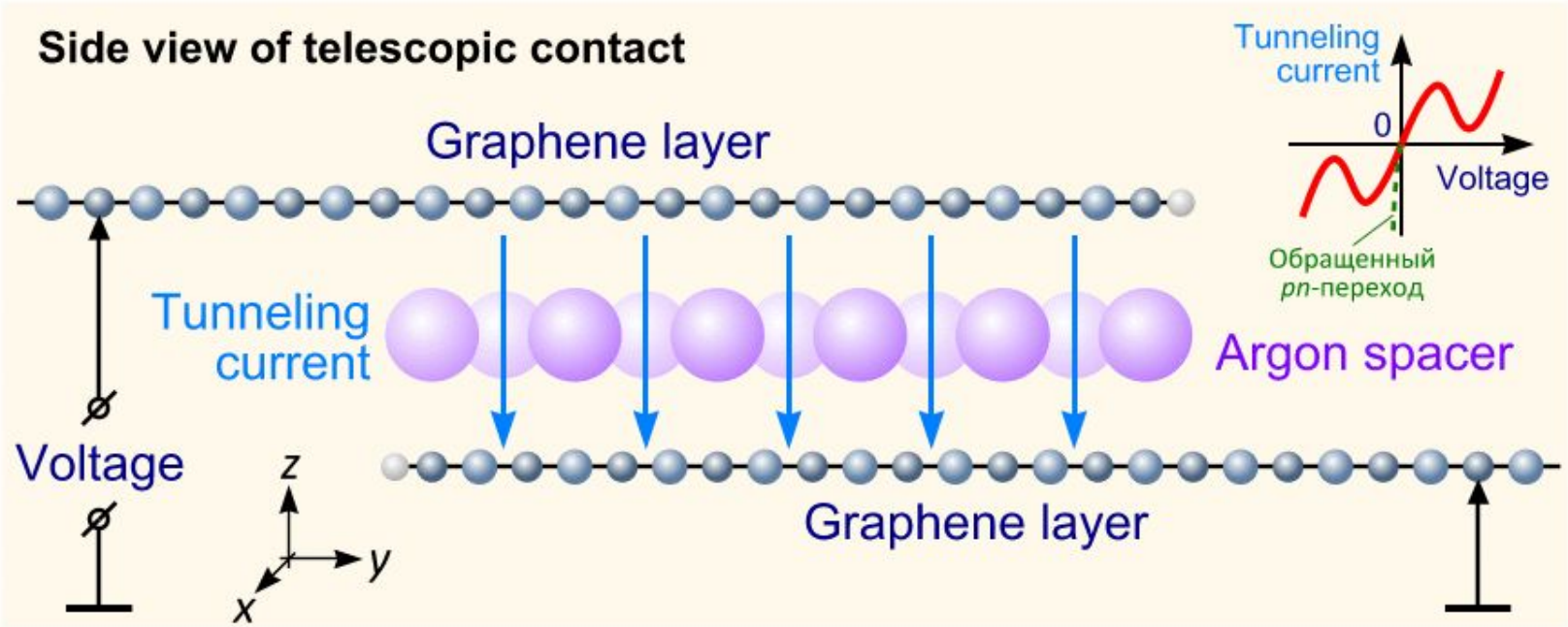


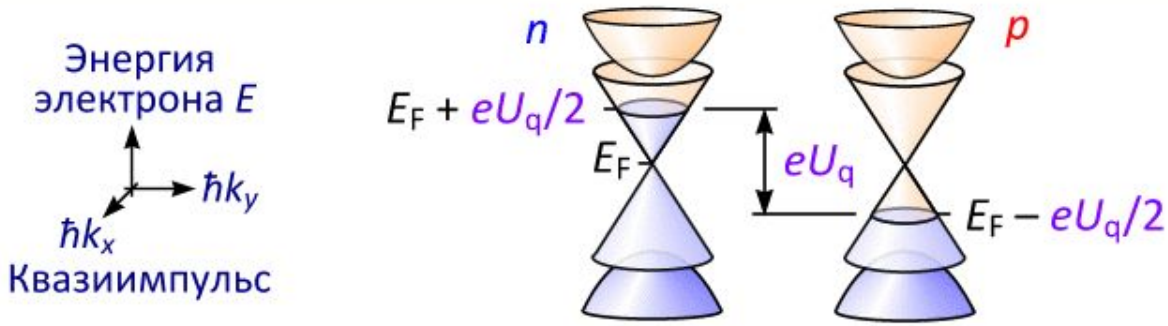
1) Измеряемая сила: 10 μN ≈ 1 mg · 9.8 m/s^2 (площадь перекрытия слоев 10^4 nm^2)

2) Half-metal: AFM ↔ FM

1. N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, I.V. Lebedeva, A.A. Knizhnik. *Graphene-based nanodynamometer.* Comp. Theor. Nanosci., **10** (1), 141–146 (2013).
2. N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, O.N. Bubel', S.V. Ratkevich. *Electronic band structure and magnetic states of zigzag graphene nanoribbons: quantum chemical calculations.* J. Nanophotonics, **6**, 061712 (2012).

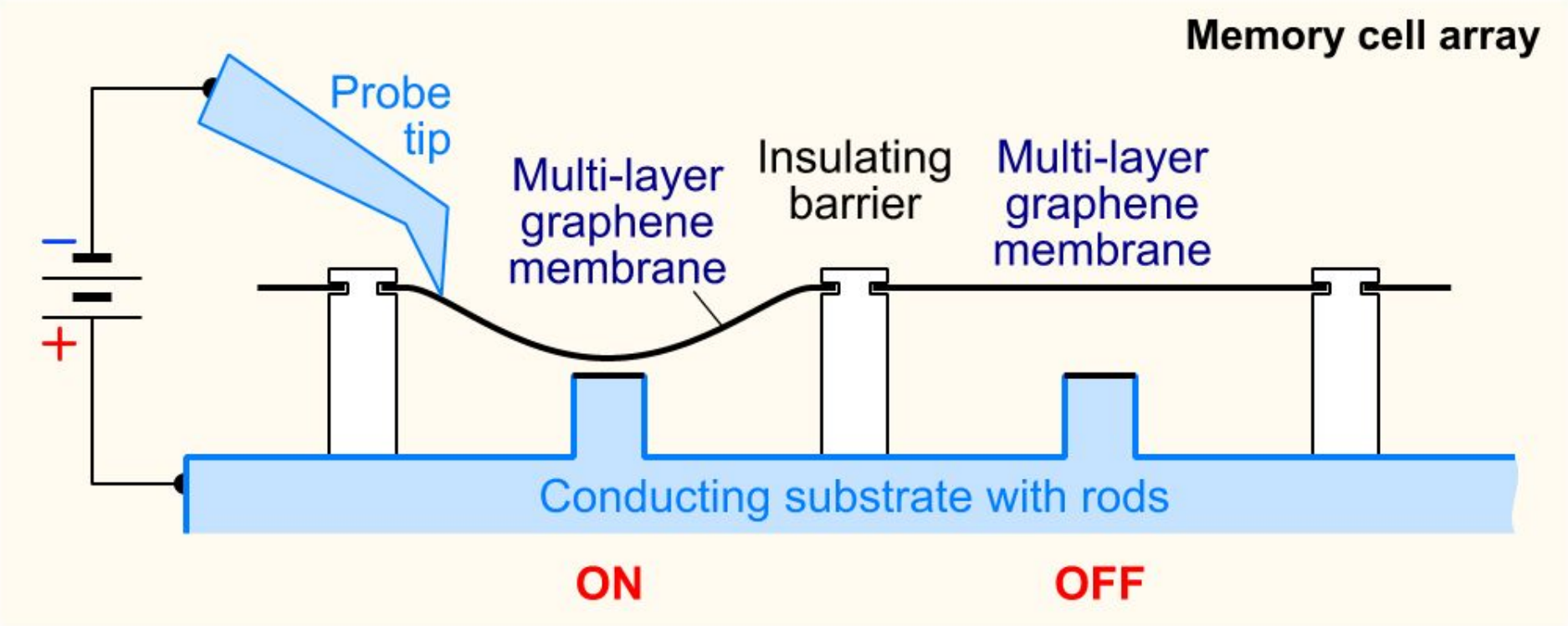
Туннельный диод: двухслойный графен с аргоновой прослойкой моноатомной толщины





1. I.V. Lebedeva, A.M. Popov, A.A. Knizhnik, Yu.E. Lozovik, N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich. *Tunneling conductance of telescopic contacts between graphene layers with and without dielectric spacer.* Comput. Mater. Sci., **109**, 240–247 (2015).
2. A.M. Popov, I.V. Lebedeva, A.A. Knizhnik, Yu.E. Lozovik, B.V. Potapkin, N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko. *AA stacking, tribological and electronic properties of double-layer graphene with krypton spacer.* J. Chem. Phys., **139** (15), 154705 (2013).

Ячейка памяти на основе многослойного графена



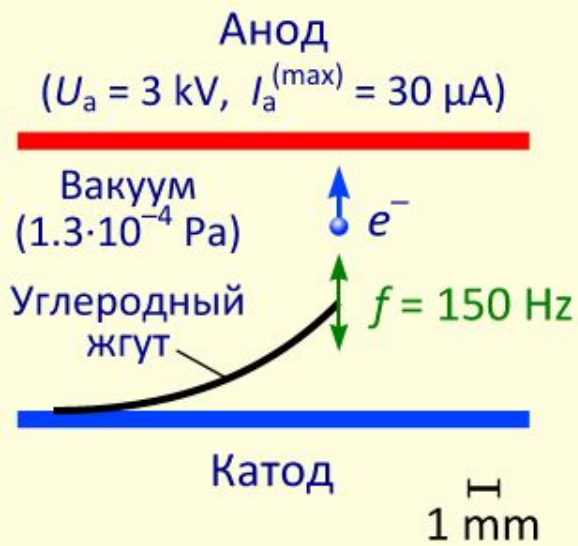
- Ячейка памяти из многослойного графена размерами от 50 до 400 nm.
- Напряжение переключения OFF ↔ ON составляет несколько вольт.
- Запись и чтение информации осуществляется зондом.

A.I. Siahlo, A.M. Popov, N.A. Poklonski, Yu.E. Lozovik, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich. *Multi-layer graphene membrane based memory cell.* Physica E, **84**, 348–353 (2016).

1. J. Yao, H. Yan, S. Das, J.F. Klemic, J.C. Ellenbogen, C.M. Lieber. *Nanowire nanocomputer as a finite-state machine.* PNAS, **111** (7), 2431–2435 (2014).
2. Е.И. Кац. *Силы Ван-дер-Ваальса, Казимира и Лифшица в мягкой материи.* УФН, **185** (9), 964–969 (2015).

Электромеханические генераторы

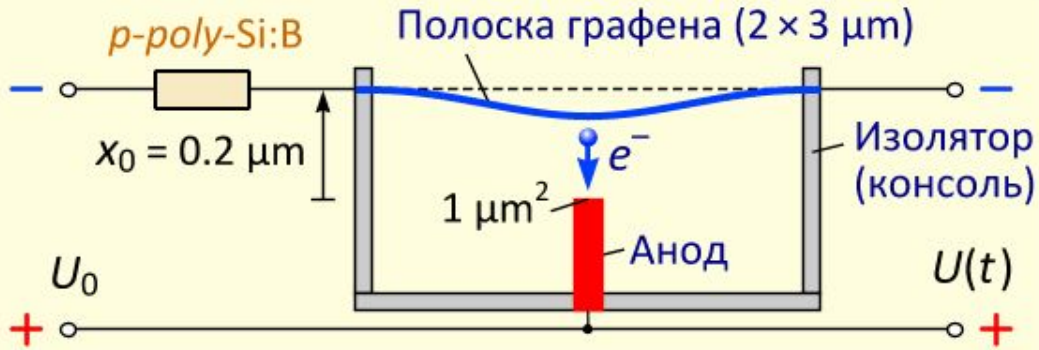
Полевая эмиссия электронов из торца углеродного волокна



1. V.I. Kleshch *et al.* Carbon, **48** (13), 3895–3900 (2010).
2. М.Д. Бельский *и др.* ЖТФ, **80** (2), 130–137 (2010).

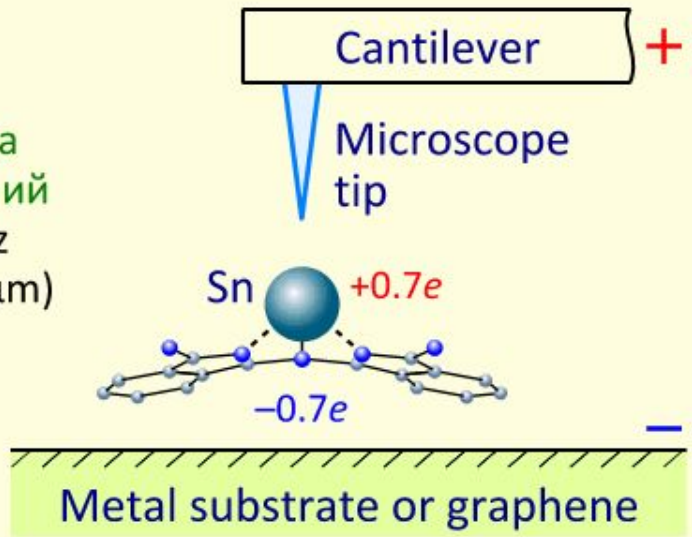
Глубина модуляции тока 100%

«Время жизни» устройства ≈5 min



Частота поперечных колебаний ≈9.8 MHz (λ ≈ 31 m)

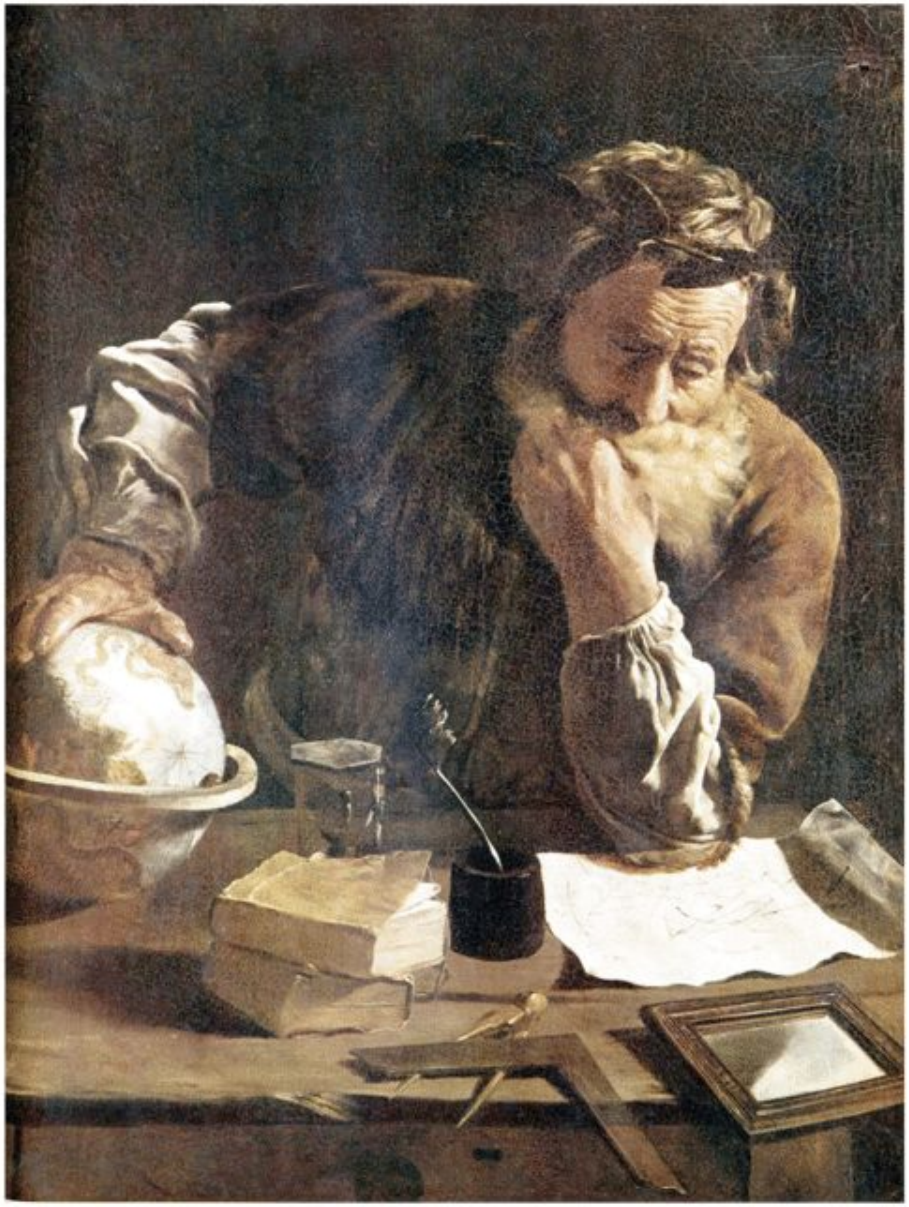
Частота колебаний ≈4 THz (λ ≈ 80 μm)



SnPc = $SnC_{32}N_8H_{16}$

N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich. *Electromechanical generator: going from micro to nano size.* Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures. Reviews and Short Notes: Proc. of the Int. Conf. Nanomeeting-2015, Minsk, 26–29 May 2015 (Singapore, World Scientific, 2015) P. 613–616.

Как выжить в технологической сингулярности?



Archimedes (287–212 BC)

Albrecht Durer, Melencolia, 1514

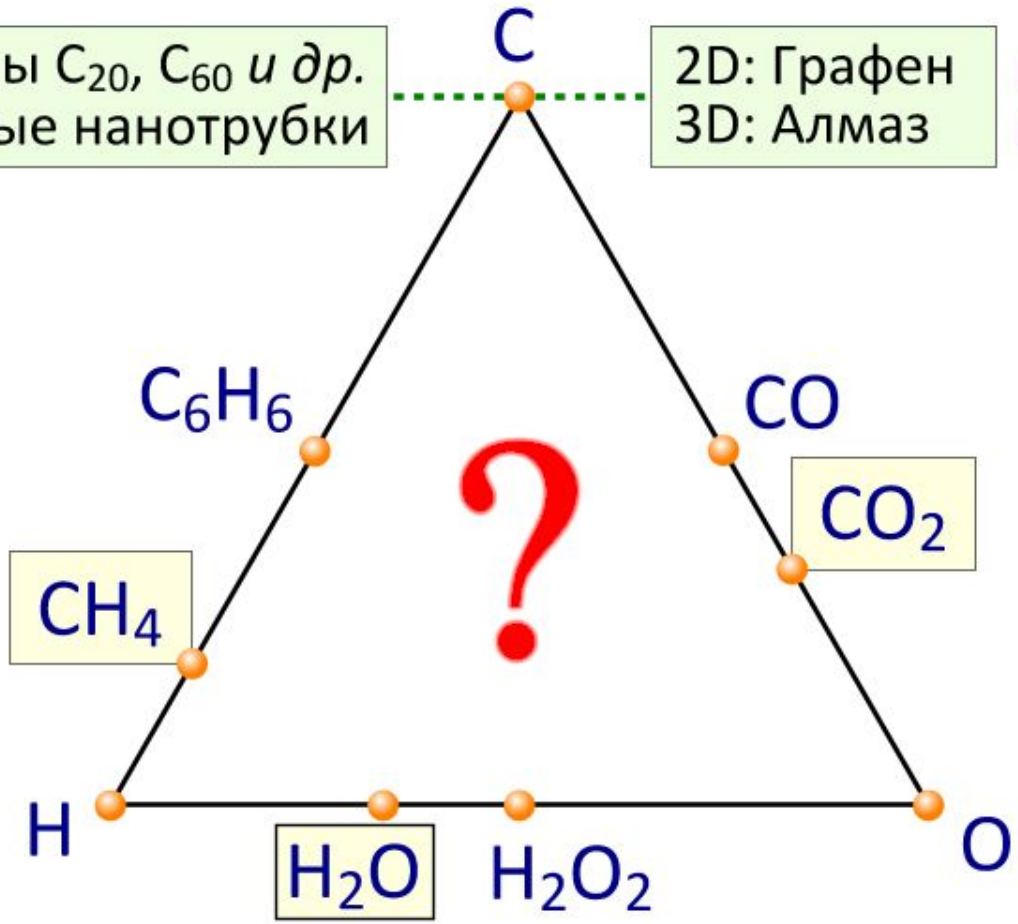
Пожар
1976

C–O–H треугольник для инженерии

0D: Фуллерены C_{20}, C_{60} *и др.*
1D: Углеродные нанотрубки

2D: Графен
3D: Алмаз

$a_{C–C}$ = 0.142 nm
$a_{C–C}$ = 0.154 nm



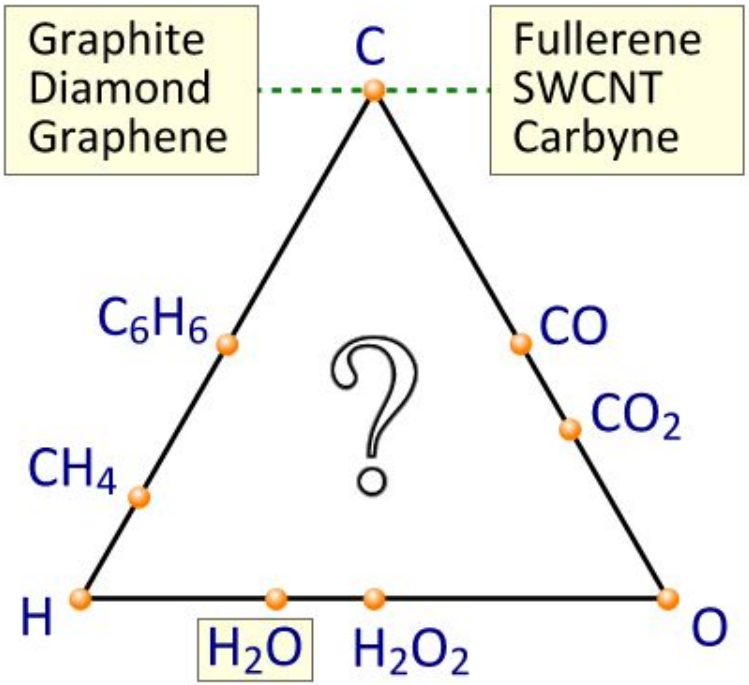
Энергии связи молекул (kJ/mol):

H_2 — 432; O_2 — 494; C_2 — 603

(1 kJ/mol = 10.36 meV на частицу)

1. D.A.C. Brownson, D.K. Kampouris, C.E. Banks. *Graphene electrochemistry: fundamental concepts through to prominent applications.* Chem. Soc. Rev., **41** (21), 6944–6976 (2012).
2. А.К. Ребров. *Возможности газофазного синтеза алмазных структур из смесей водорода и углеводородов.* УФН, **187** (2), 193–200 (2017).

Конденсация и диссоциация: молекулярные аспекты симметрии



Водородная энергетика

Энергии связи молекул (kJ/mol):

H_2 — 432; O_2 — 494; C_2 — 603

Синтез алмаза из газовой фазы

$$2CO \rightleftarrows C_{Dia} + CO_2$$

$$CO + H_2 \rightleftarrows C_{Dia} + H_2O$$

$$CH_4 + CO_2 \rightleftarrows 2C_{Dia} + 2H_2O$$

Разложение алмаза

$$\text{Алмаз} \xrightarrow[900\,^\circ C]{\text{Воздух}} CO_2 \uparrow$$

$$\text{Алмаз} \xrightarrow[1700\,^\circ C]{\text{Вакуум}} \text{Графит}$$

$$\text{Антрацит} \xrightarrow[2500\,^\circ C]{\text{Вакуум}} \text{Синтетический графит (практика)}$$

(1 kJ/mol = 10.36 meV per particle)

1. R.B. Little, J. Roache. *Treatise on the Resolution of the diamond problem after 200 years.* Prog. Solid State Chem. **36** (3), 223 (2008).
2. P.W. May. *Diamond thin films: a 21st-century material.* Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, **358**, 473 (2000).
3. А.П. Руденко, И.И. Кулакова, В.Л. Скворцова. *Химический синтез алмаза. Аспекты общей теории.* Успехи химии, **62** (2), 99 (1993).
4. Р. Вудворт, Р. Хофман. *Сохранение орбитальной симметрии* (М.: Мир, 1971).

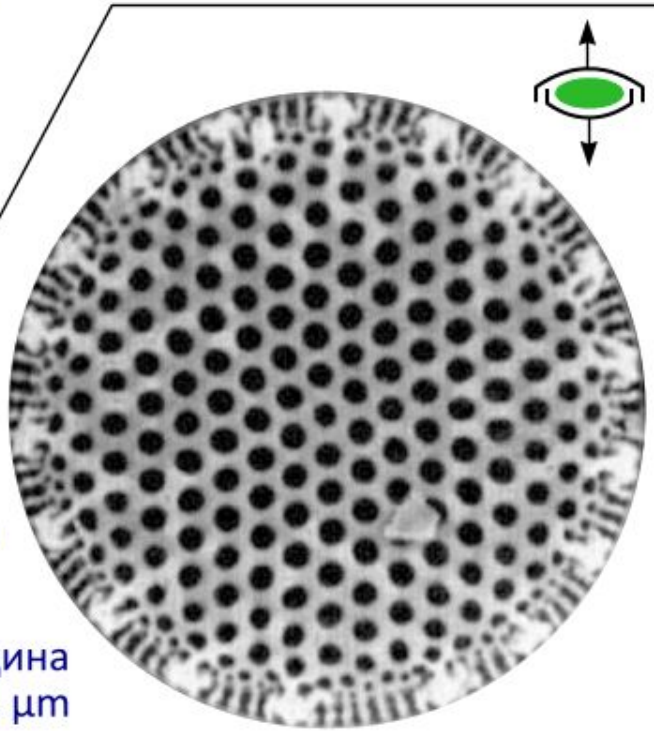
Локальная симметрия в природе

Филлотаксис. Ряды ближайших чешуй шишки сосны образуют два семейства спиралей: левовинтовые и правовинтовые. Число левых и число правых спиралей являются соседними в последовательности чисел Фибоначчи: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, ... Эта закономерность является эмпирической и ее причины неясны.

1. Л.С. Левитов. *Числа Фибоначчи в ботанике и физике: филлотаксис.* Письма в ЖЭТФ, **54** (9), 542 (1991).
2. А.А. Андронов. *Хиральность: вращение поляризации, принцип детального баланса и жизнь.* УФН, **177** (3), 315 (2007).

К биологической наносборке SiO_2-структур

Диатомея (от гр. *diatomē* — рассечение надвое; одноклеточная водоросль) формирует внешнюю твердую оболочку самосборкой (молекула за молекулой) из SiO_2, растворенного в H_2O при $T \approx 300$ К. ($SiO_2 + 2H_2O = H_4SiO_4$ — кремниевая кислота; в морской воде [Si] — около 6 ppm.)



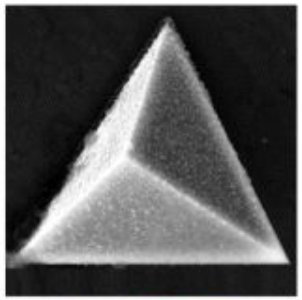
1 μm

Толщина 0.1–1 μm

1. M.L. Green, E.P. Gusev, R. Degraeve, E.L. Garfunkel. *Ultrathin (< 4 nm) SiO_2 and Si–O–N gate dielectric layers for silicon microelectronics: Understanding the processing, structure, and physical and electrical limits.* J. Appl. Phys., **90** (5), 2057 (2001).
2. В.А. Гриценко. *Структура границ раздела кремний/оксид и нитрид/оксид.* УФН, **179** (9), 921 (2009).

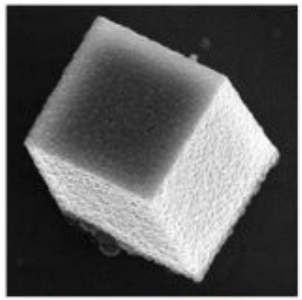
Микрокристаллы: 5 тел Платона

тетраэдр



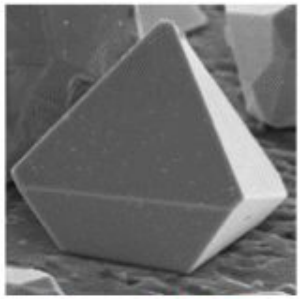
5 μm

куб



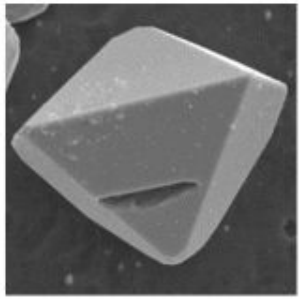
3 μm

октаэдр



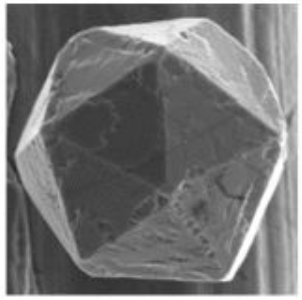
8 μm

октаэдр



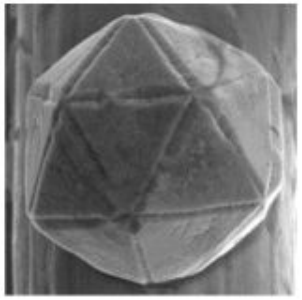
6 μm

икосаэдр



10 μm

икосаэдр



10 μm

Микрокристаллы меди (Cu) в форме правильных многогранников (платоновых тел), полученные при электроосаждении из раствора электролита (сканирующая электронная микроскопия)

додекаэдр

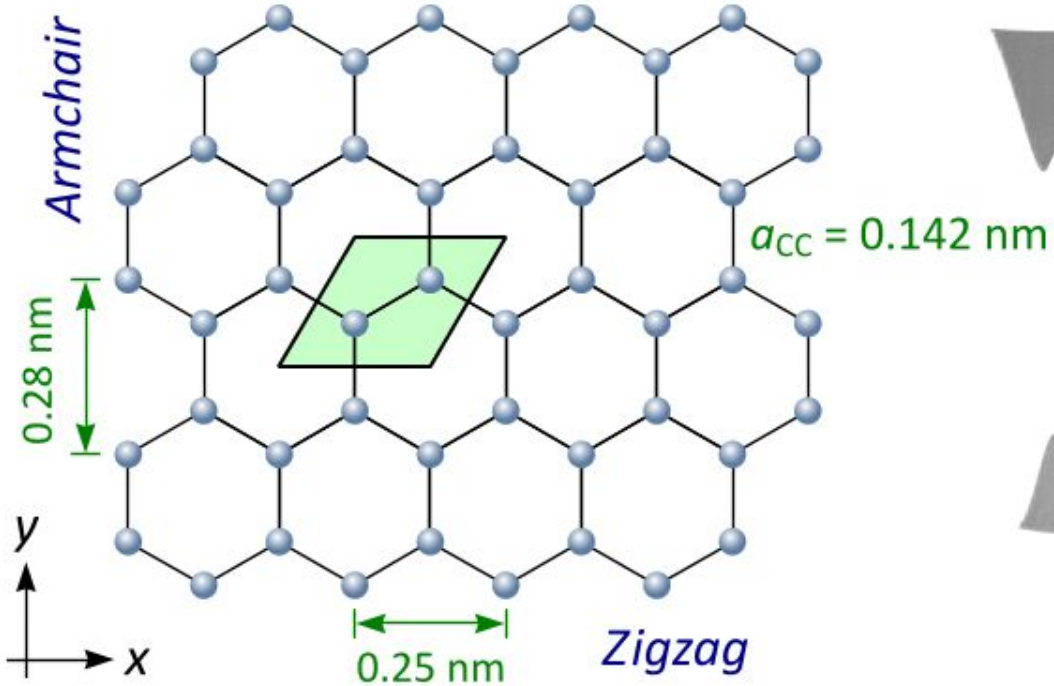
6 mm

Кристалл пирита (Fe_2S), содержащий «штриховку» на грани — двойники (оптическая макросъемка)

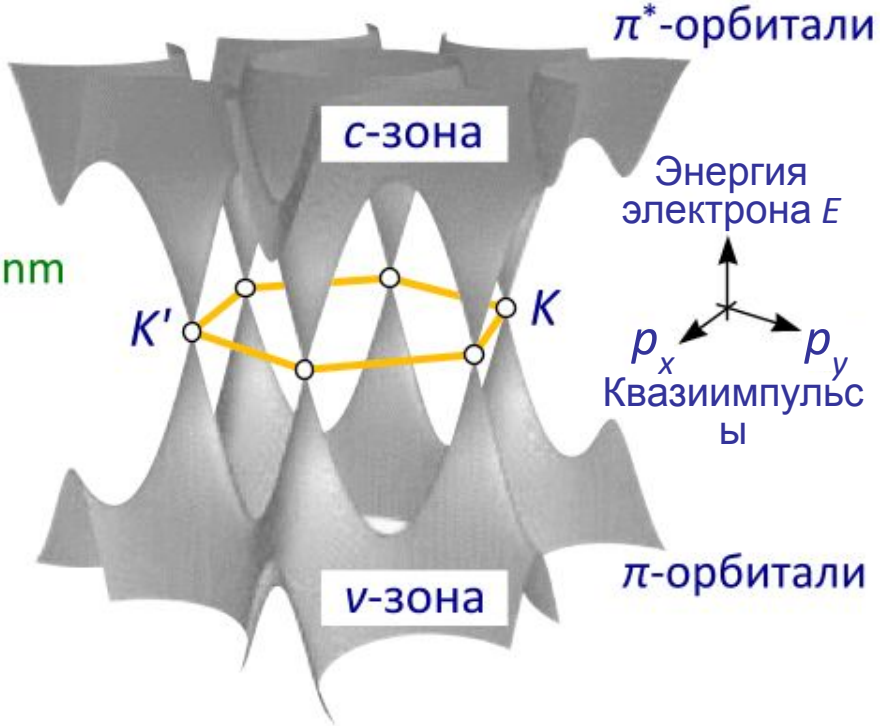
И.С. Ясников. *К вопросу о существовании однокомпонентных малых металлических частиц с габитусом, близким к додекаэдрическому.* ФТТ, **53** (9), 1815–1819 (2011).

Графен: кристаллическая структура и одно-электронная энергетическая зонная диаграмма

Двумерная углеродная сетка



Зонная структура $E(k)$ графена

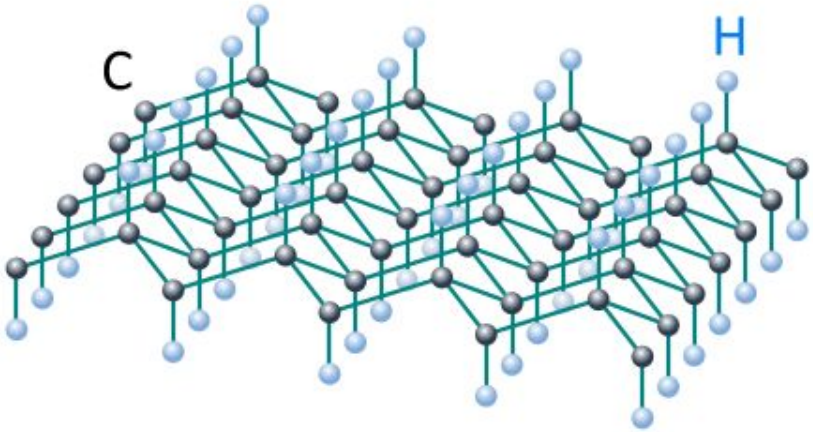


Полупроводник с нулевой запрещенной зоной (энергетической щелью) для π-электронов и нулевой эффективной массой и электрона c-зоны, и дырки v-зоны

В точках Дирака (K-точках) электроны (и дырки — электронные вакансии) ведут себя как релятивистские частицы со скоростью Ферми $v_F \approx c/300 \approx 10^6$ m/s, где c — скорость света в вакууме, $E_F = \hbar k v_F$ — энергия Ферми

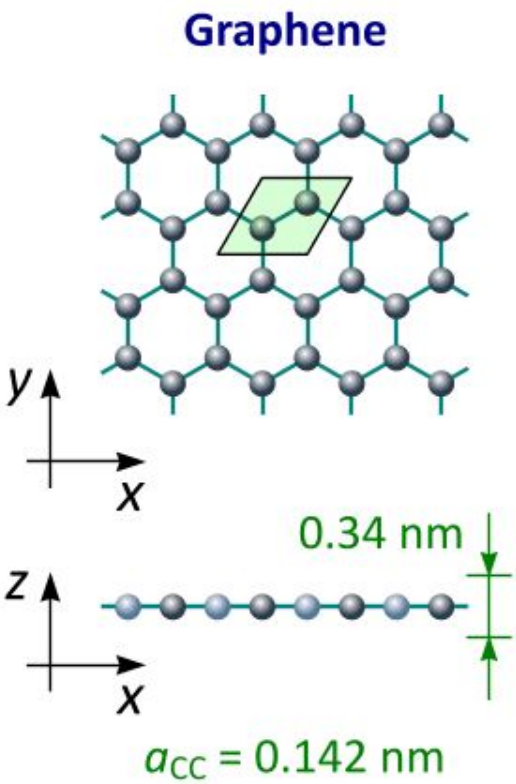
С.В. Морозов, К.С. Новоселов, А.К. Гейм. УФН, **178** (7), 776 (2008).

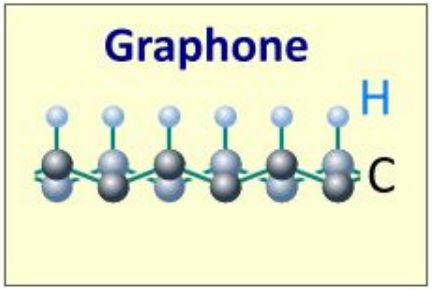
Графан = Графен + H — аналог трехмерного алмаза

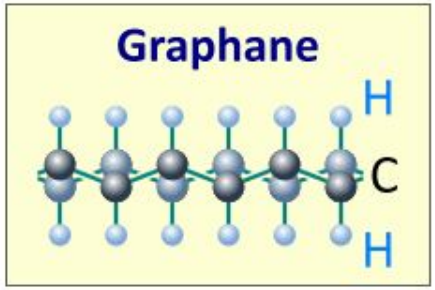


Графан — каждая π-орбиталь образует химическую связь с s-орбиталью атома водорода

C–C-связи в графане sp^3-гибридизованы







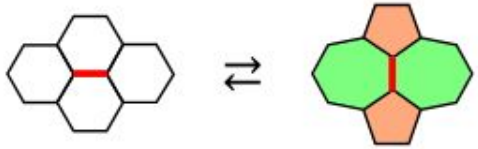
Графон — графен, пассивированный водородом с **одной** стороны

Графан — графен, пассивированный водородом с **двух** сторон

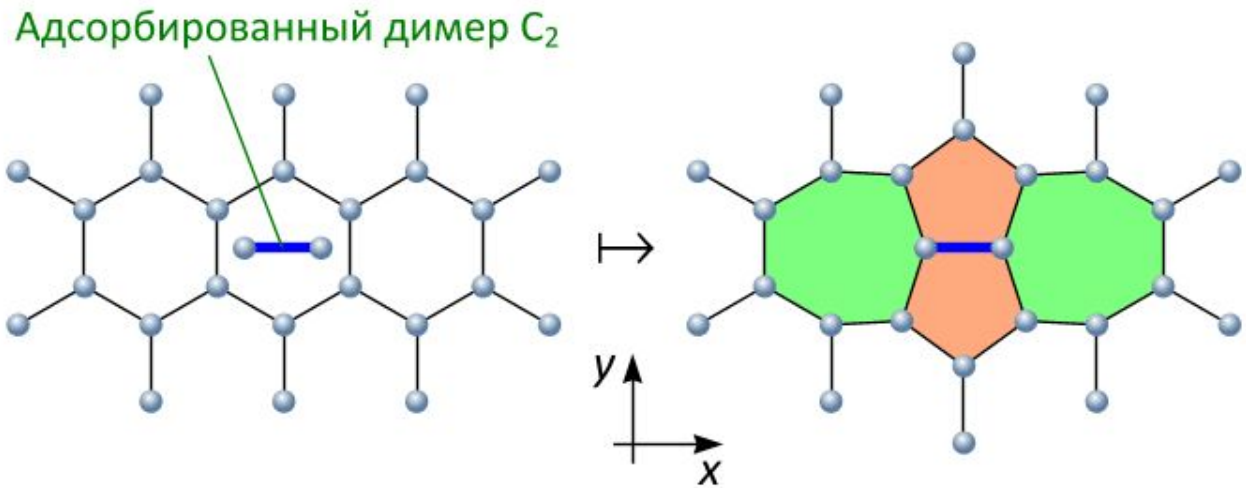
1. D.C. Elias *et al.* *Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphane.* Science, **323** (5914), 610–613 (2009).
2. N.A. Poklonski *et al.* *Electronic band structure and magnetic states of zigzag graphene nanoribbons: quantum chemical calculations.* J. Nanophotonics, **6**, 061712 (2012).

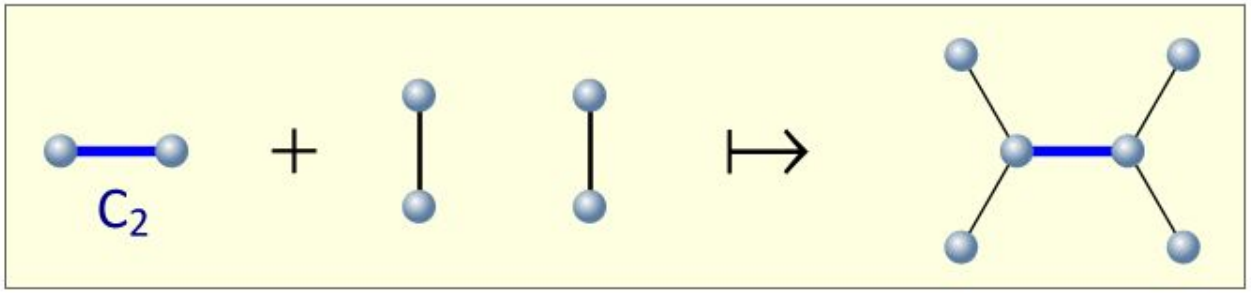
Выпуклость на графеновой плоскости

Перегруппировка
с образованием дефекта
Стоуна–Уоллеса

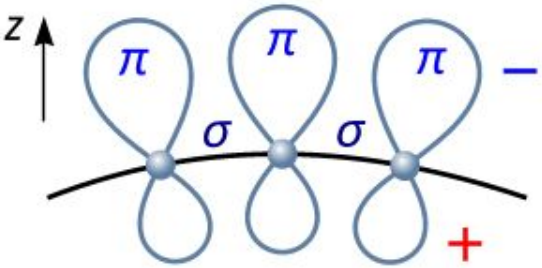


Возникновение
и исчезновение
собственных дефектов
в графене





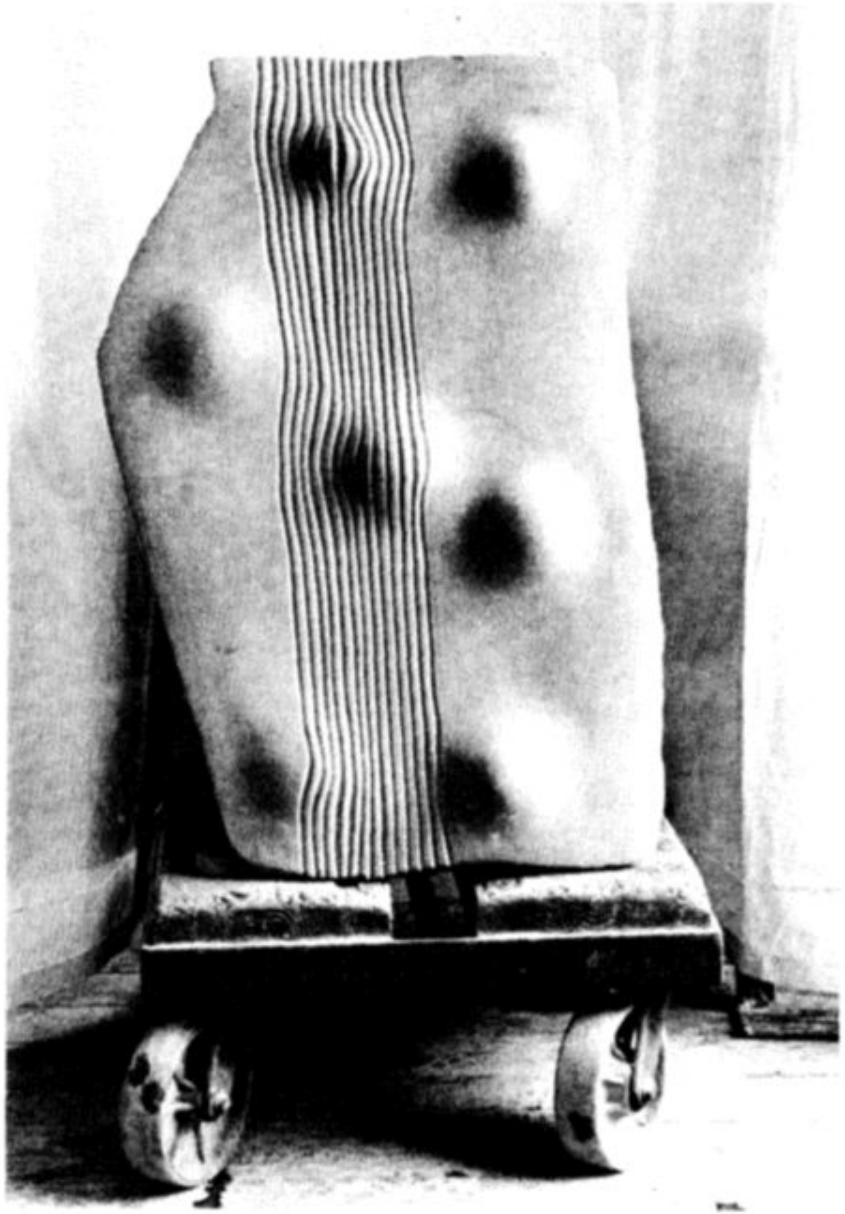
Локальный дипольный момент изогнутого графена



Дефект (два 7-угольника и два 5-угольника) образуется при внедрении молекулы C_2 и создает *выпуклость* на графеновой плоскости

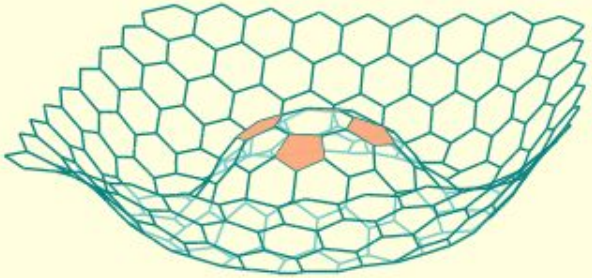
Возможно "выворачивание" выпуклости, т. е. переход выступающих из графеновой плоскости атомов с одной стороны на другую. При наличии у такой выпуклости электрического дипольного момента, выворачивание может сопровождаться излучением (или поглощением) одного фотона.

Вслух о предстоящем



Графен — инженерная поверхность?

Деформация углеродной воронки во внешнем электрическом поле



1. Ф. Экстром, Д. Вайнлэнд. *Изолированный электрон.* УФН, **134** (4), 711–730 (1981).
2. С. Чу, К. Коэн-Тануджи, У.Д. Филипс. *Развитие методов охлаждения и пленения атомов с помощью лазерного света.* УФН, **169** (3), 271 (1999).

Скульптор Рудольф Ремпфлер (Цюрих): деформация поверхности сферами

Г. Бинниг, Г. Рорер. *Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности.* УФН, **154** (2), 261 (1988).