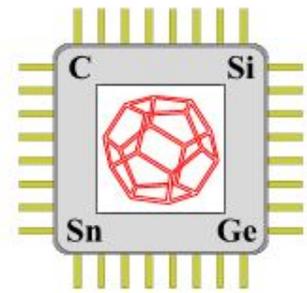




Белорусский государственный
университет
Физический факультет
Кафедра физики полупроводников и
наноэлектроники



Графен: от существующего к возникающему

проф. Н.А. Поклонский

Лекция в минском Планетарии, 29 апреля 2017

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 C).



Свет и графен

3. *Vestigial semper adoret!*

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

496 с.

4. ? — универсальный ключ

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

0D

Карбо-
додекаэдр
 C_{20}



0.42 nm

1D

SWCNT
zigzag (9,0)

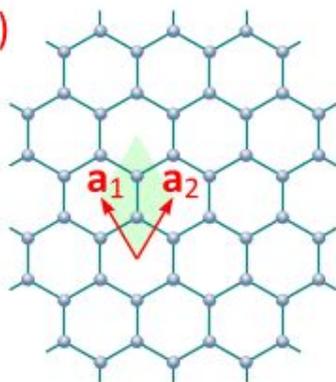


$\frac{9}{\pi} \sqrt{3} a_g$

$C(m,n)$

2D

Графен

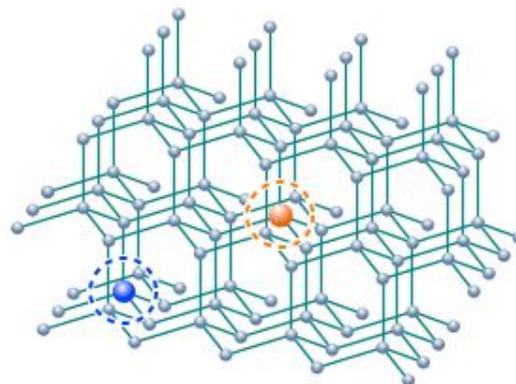


$$C(m,n) = ma_1 + na_2 \equiv (m,n)$$

$$a_g = a_{CC} = 0.142 \text{ nm}$$

3D

Алмаз
(Dia:N,B)

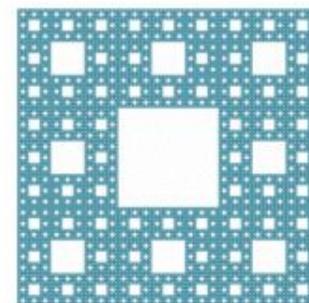


$$a_{\text{Dia}} = a_{CC} = 0.154 \text{ nm}$$

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

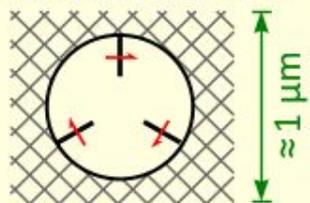
Фрактальная (d)

Квадрат
Серпинского



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

Пора с радикалами
в кристаллической
матрице алмаза

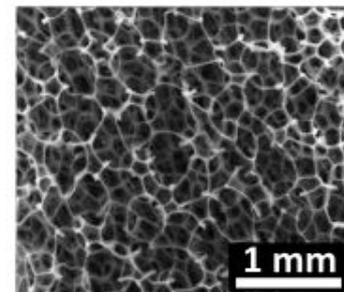


Элемент
спинового стекла

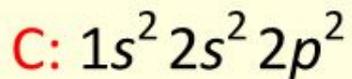
Низкоразмерная система — консолидированная система многих частиц, протяженность которой вдоль хотя бы одного направления в пространстве координат сравнима с одним из параметров размерности длины, характеризующих состояния и/или процессы в системе.

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

Углеродная пена



1 mm



Алмаз

$a_{C-C} = 0.154 \text{ nm}$

Графит

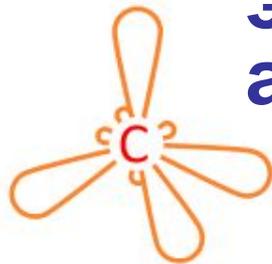
$a_{C-C} = 0.142 \text{ nm}$

$d = 0.341 \text{ nm}$

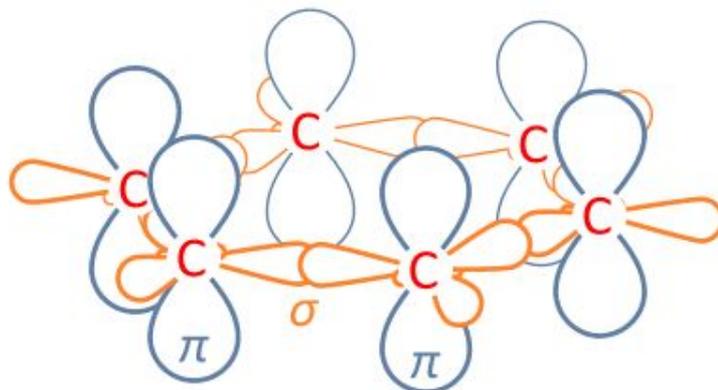
Карбин

$a_{C-C} = 0.128 \text{ nm}$

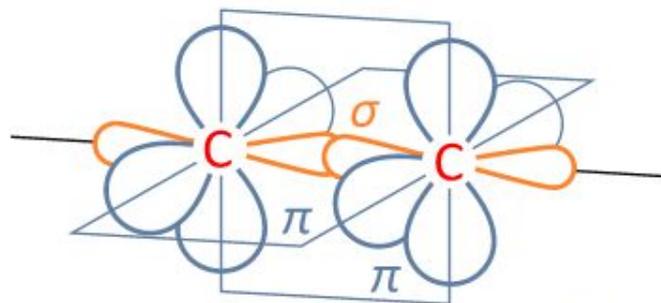
Гибридизация электронных орбиталей атомов углерода



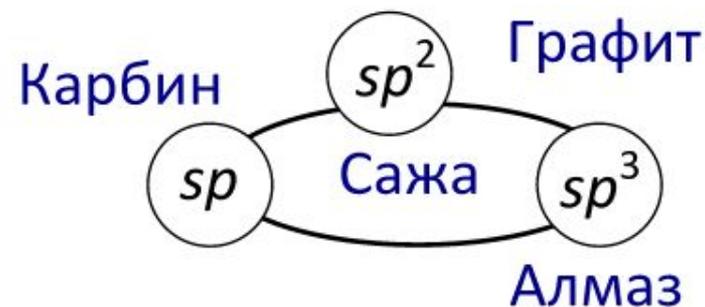
$sp^3: |2s\rangle, |2p_x\rangle, |2p_y\rangle, |2p_z\rangle$



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



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



Алмазы: цари среди царей



Природный алмаз
616 карат = 123 г



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

Точечная группа симметрии T_d



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

Синтез монокристаллов алмаза

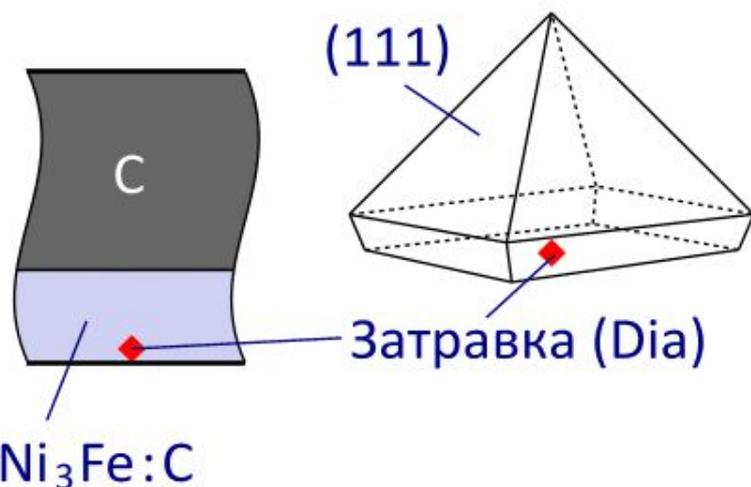
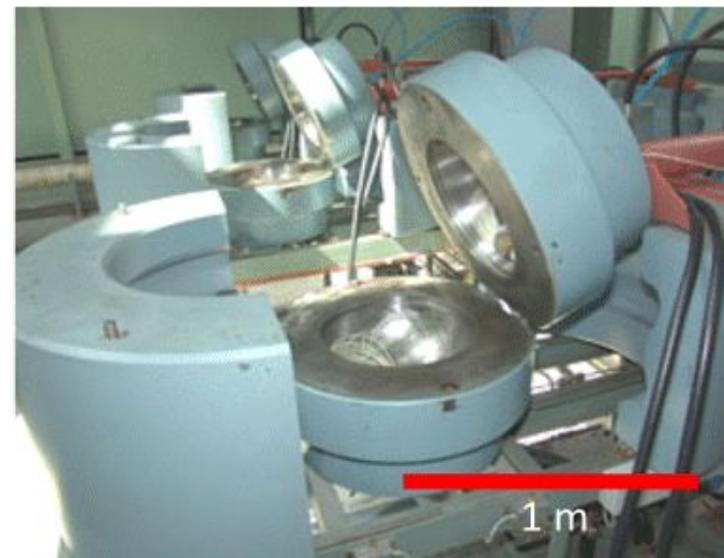
Ni-Fe-C

$P_s = 5.5 \text{ GPa}$

$T_s = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_s \approx 70 \text{ h}$

$I \cdot U = 1.3 \text{ kW}$



1 carat = 200 mg
1 atm = $1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

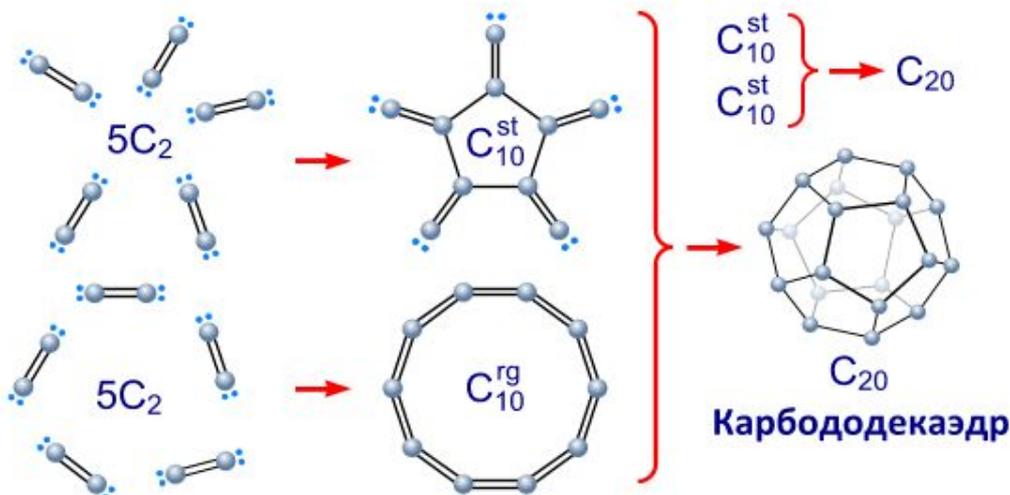
Алмазы массой до 3 карат выращиваются на аппаратах типа «разрезная сфера» методом температурного градиента (РУП «Адамас» при Белорусском государственном университете, г. Минск).

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



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

Формирование фуллеренов (в углеродной плазме)



Фуллерит

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

$\frac{12}{13} C = \frac{98.89}{1.11}$
 ^{13}C – NMR
 $T = 300$ К: fcc, пластический кристалл
1.405 nm

C_{60}
 $a_p = 0.1384$ nm
 $a_h = 0.1458$ nm
0.711 nm

Мир углерода ($C: 1s^2 2s^2 2p^2$)

$$C_p \propto T^3$$

Кубический
Гексагональный

Алмаз

sp^3 -орбитали

$$4\sigma: |2s\rangle, |2p_x\rangle, |2p_y\rangle, |2p_z\rangle$$

$$a_{CC} = 0.154 \text{ nm}$$

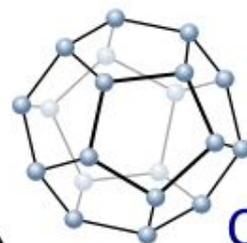
Плотность, g/cm^3

Фуллерит	1.7
Графит	2.3
Алмаз	3.5

sp^2 -орбитали

$$3\sigma: |2s\rangle, |2p_x\rangle, |2p_y\rangle$$

$$\pi: |2s\rangle, |2p_z\rangle$$



C_{20}

Фуллерены

Баррелены

Нанотрубки

Графен

sp -орбитали

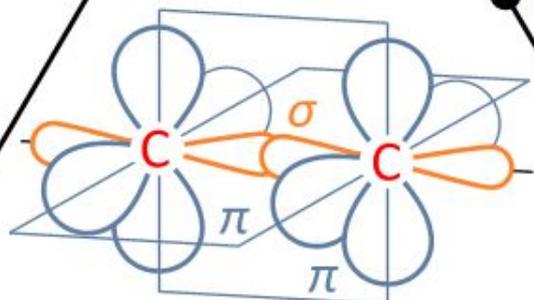
$$2\sigma: |2s\rangle, |2p_x\rangle$$

$$\pi: |2s\rangle, |2p_y\rangle$$

$$\pi: |2s\rangle, |2p_z\rangle$$

Полииновая форма
 $\sim C \equiv C - C \equiv C - C \sim$

Кумуленовая форма
 $\sim C = C = C = C = C \sim$



$$C_p \propto T$$

sp

Карбин

$$a_{CC} = 0.128 \text{ nm}$$

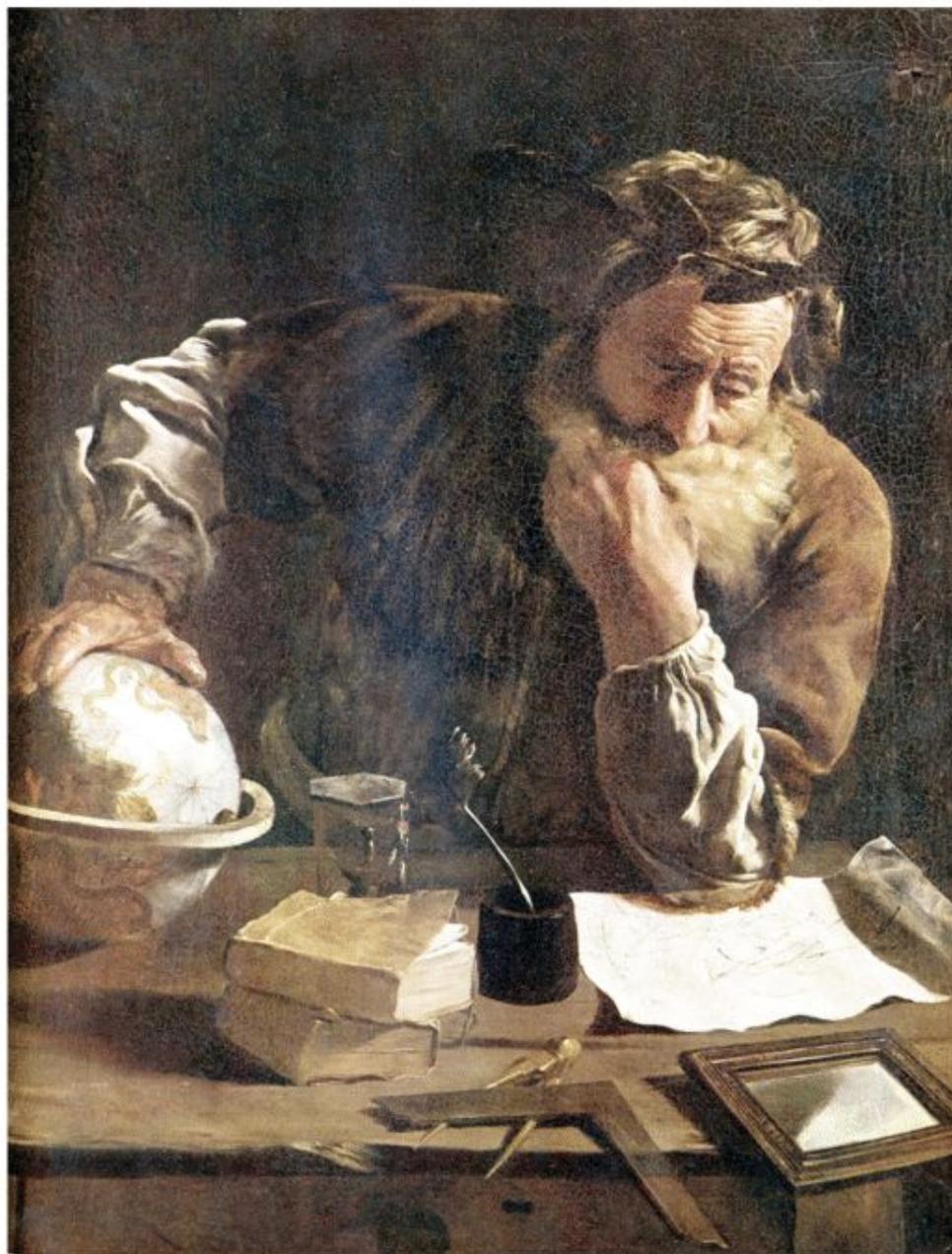
$$d = 0.341 \text{ nm}$$

$$a_{CC} = 0.142 \text{ nm}$$

Графит

$$C_p \propto T^2$$

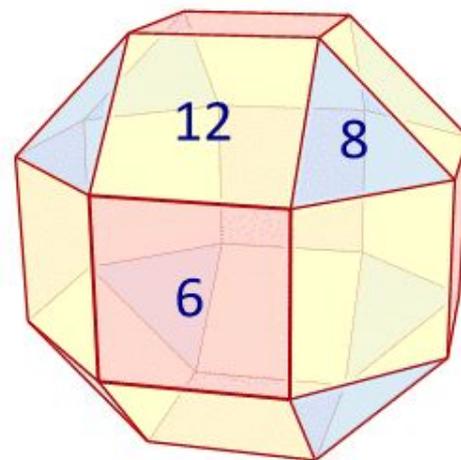
Гексагональный
Ромбоэдрический



Архимед (287 — 212 до н.э.)



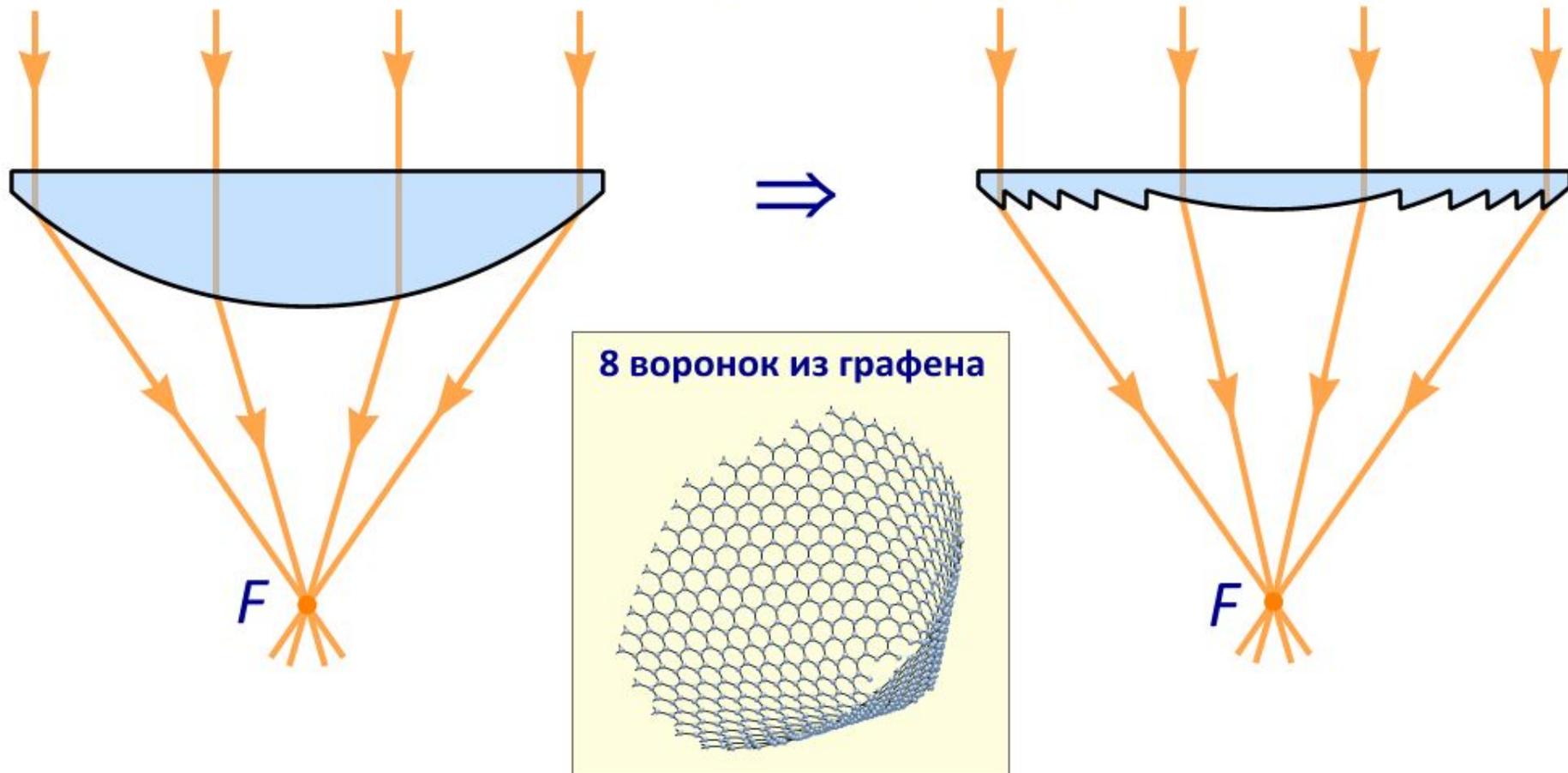
Национальная библиотека Беларуси (2006 г.)



Ромбокубооктаэдр
(2 типа симметрии; 1957 г.)

0D ↔ 1D ↔ 2D ↔ 3D

Линза Френеля (1823 г.)



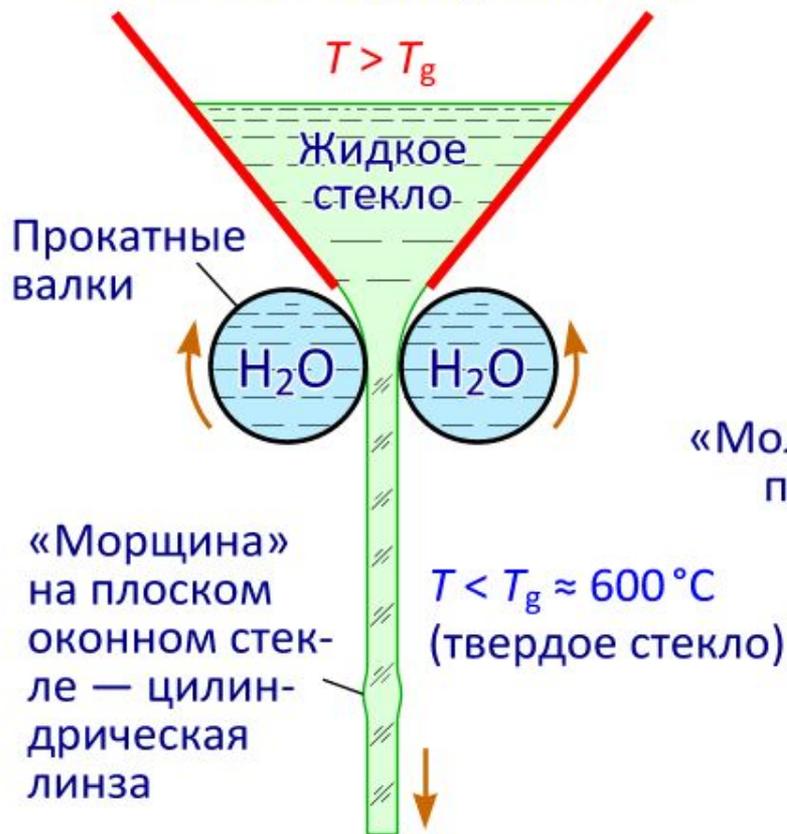
1. Р. Уинстон. *Неизображающая оптика*. В мире науки, № 5, 44–50 (1991).

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. / V.I. Stepanov Institute of Physics, NASB (Minsk: Kovcheg, 2012) Vol. II, P. 511–514.

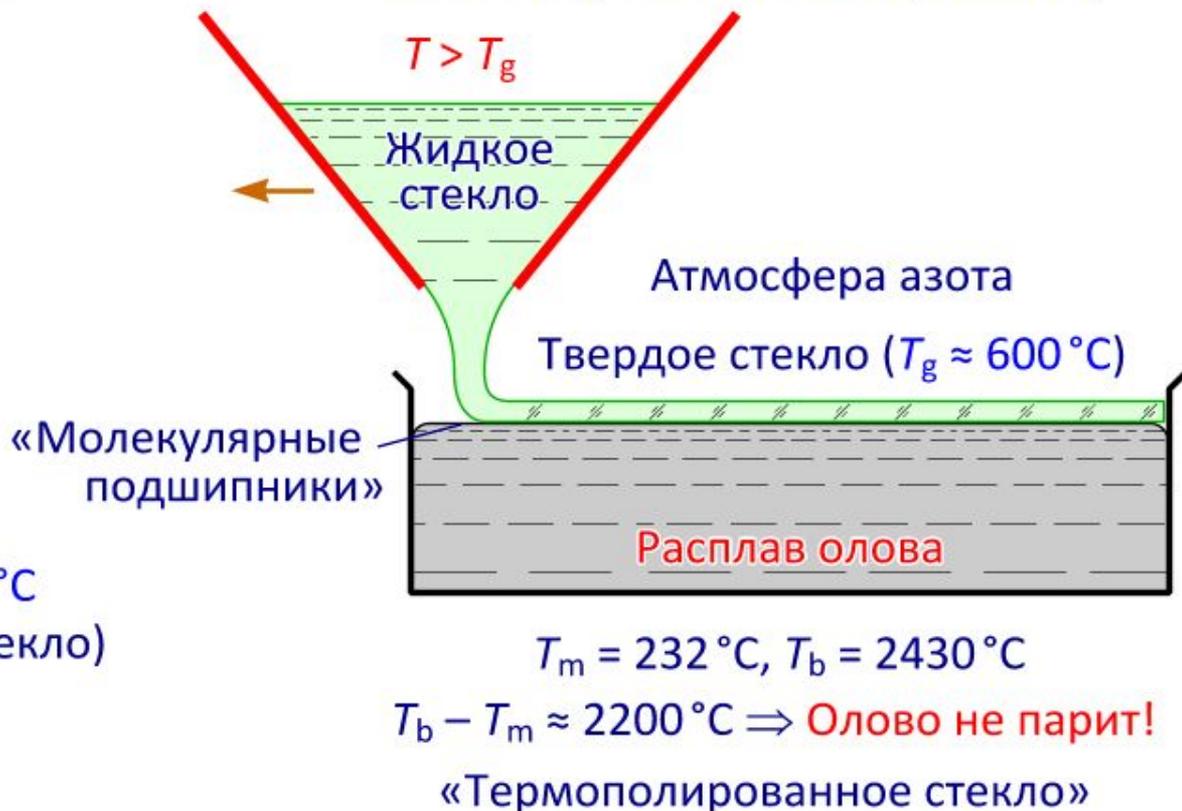
2. Н.А. Поклонский. *Концентраторы солнечного света*. Энциклопедия для школьников и студентов. В 12 т. Т. 4. Мир техники / под общ. ред. Н.А. Поклонского (Минск: Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2012) 712 с.

Две технологии изготовления плоского стекла

1902 г. (Э. Фурко, Бельгия)

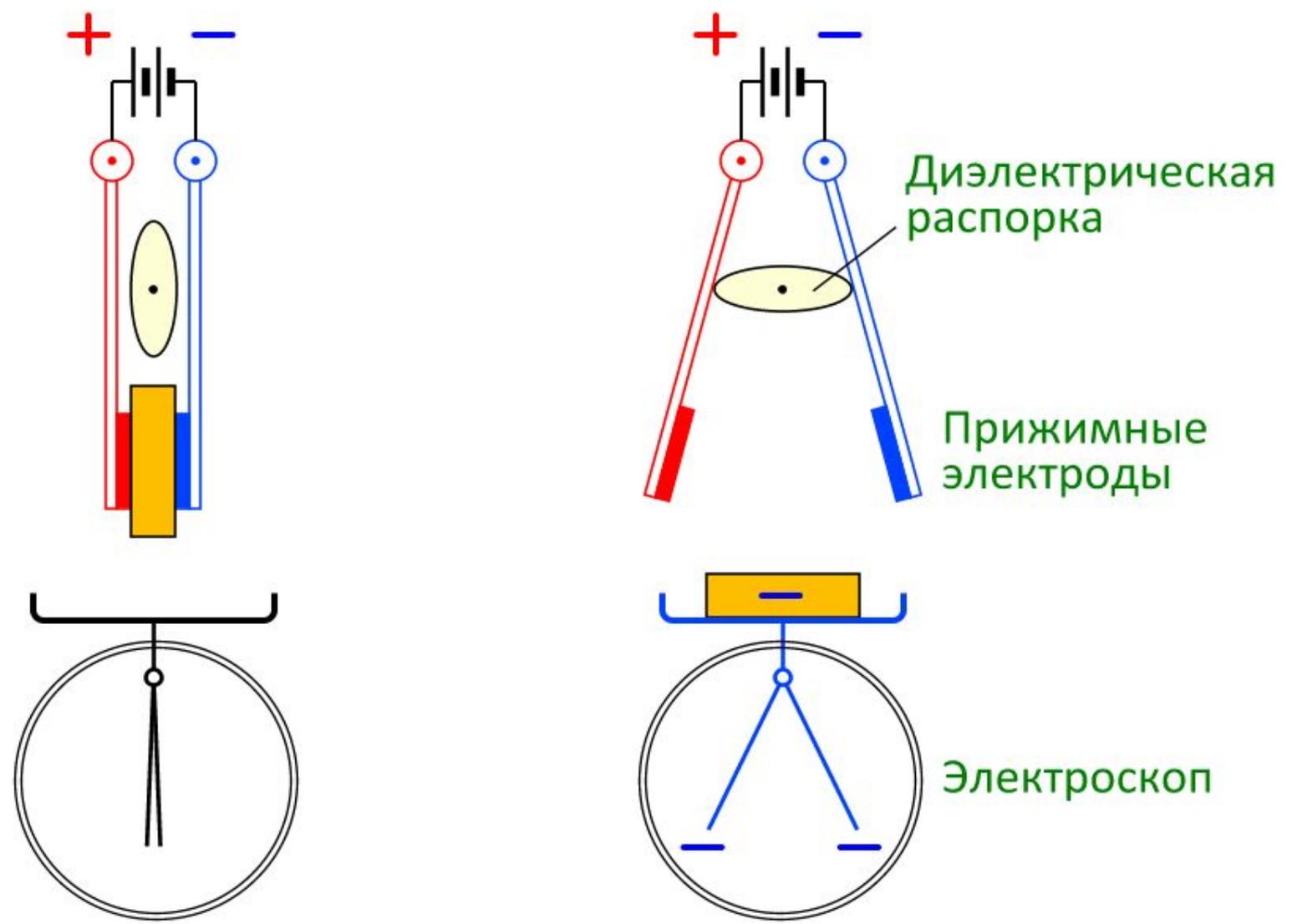


1952 г. (А. Пилкингтон, Англия)

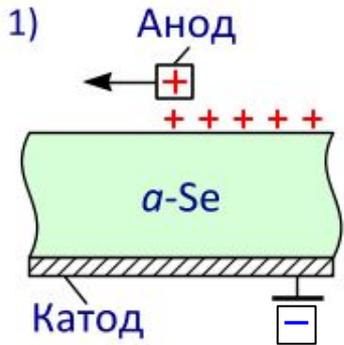


Чем медленнее охлаждается стекло, тем оно менее прозрачно, так как ближе к кристаллическому состоянию.
Чем ближе расположены атомы примесей в стеклянной матрице, тем сильнее эффект «отталкивания» их энергетических уровней.

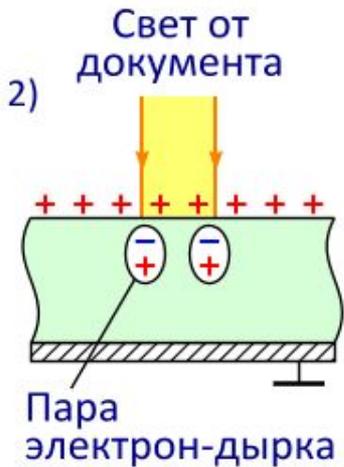
Инжекция электронов в диэлектрик



Ксерографический процесс

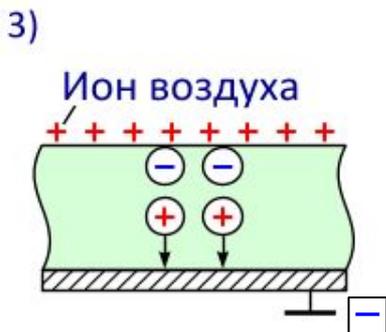


1) Положительно заряженный анод в виде нити движется в темноте параллельно поверхности α -Se и положительно заряжает её ионами воздуха посредством коронного разряда. При этом на катоде, на который нанесен слой α -Se, образуется равный по величине отрицательный заряд. В итоге ионы воздуха и катод создают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



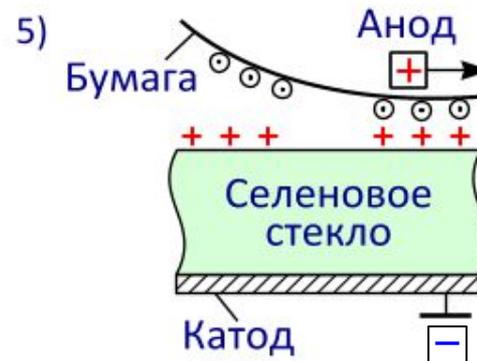
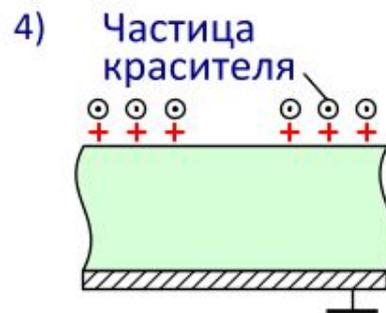
2) На поверхность α -Se проецируют оптическое изображение копируемого документа. Исходящие от светлых областей оригинала фотоны при поглощении в селеновом стекле создают как подвижные электроны, так и подвижные дырки.

3) Под действием электростатического поля внутри слоя α -Se электроны дрейфуют к ионам воздуха на поверхности стекла и локально нейтрализуют их положительный заряд. В результате поверхность α -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 темная область. Дырки имеют положительный заряд, поэтому они дрейфуют к катоду и частично нейтрализуют его отрицательный заряд.



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

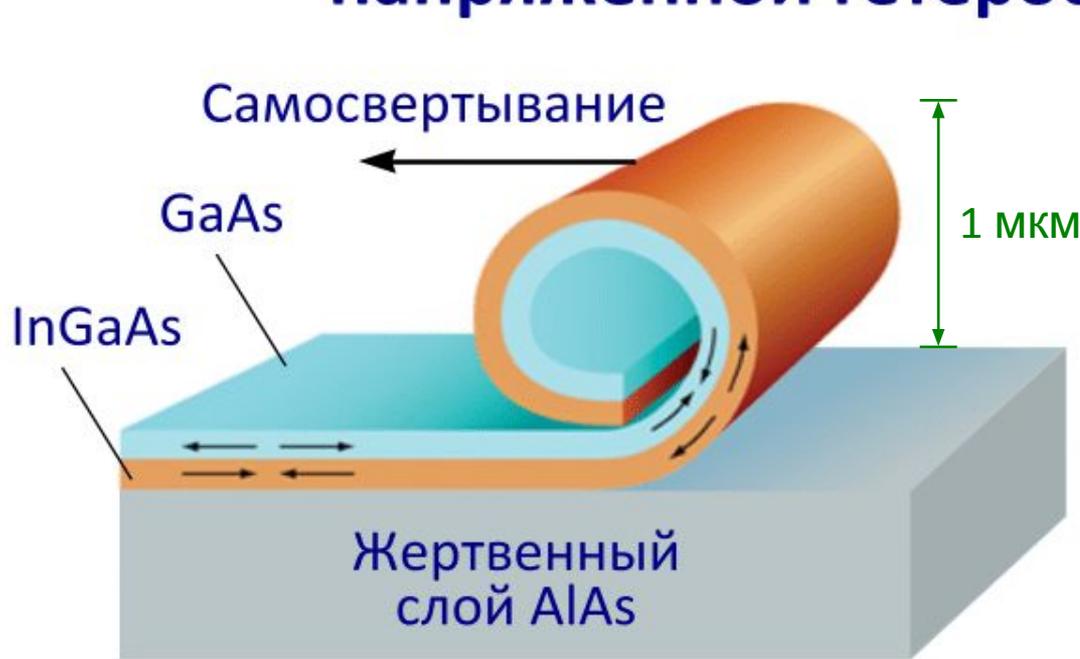
5) На стекло кладут лист бумаги. При втором прохождении анода краситель переполаризуется и переносится с α -Se на бумагу. Полученное на бумаге изображение закрепляют. Остаточные заряды на селеновом стекле и бумаге нейтрализуют.



Ч. Карлсон (1938 г.)

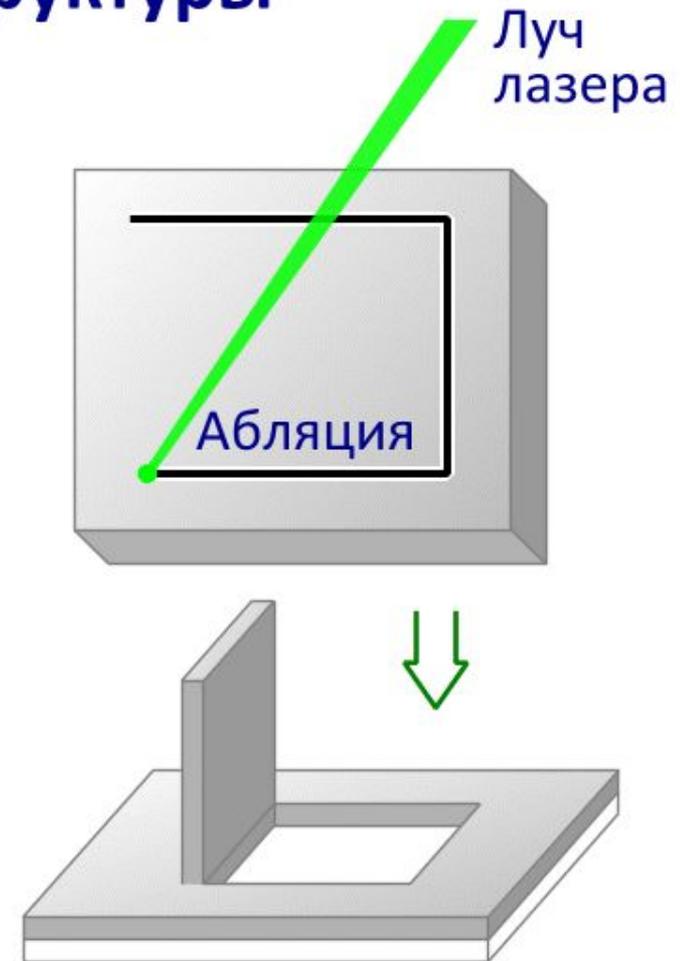


Рулоны из молекулярно тонких слоев напряженной гетероструктуры



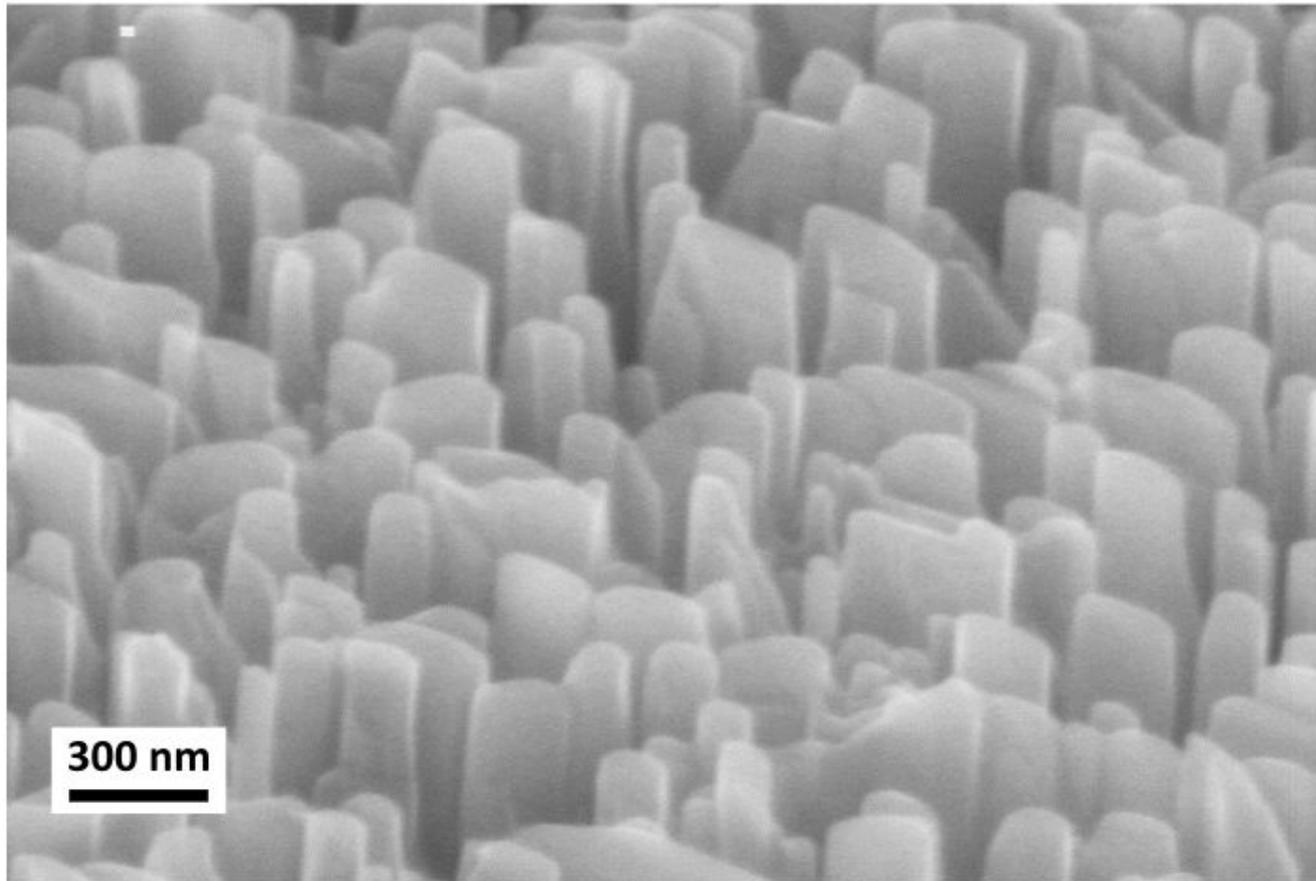
Диаметр рулона определяется:

- 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

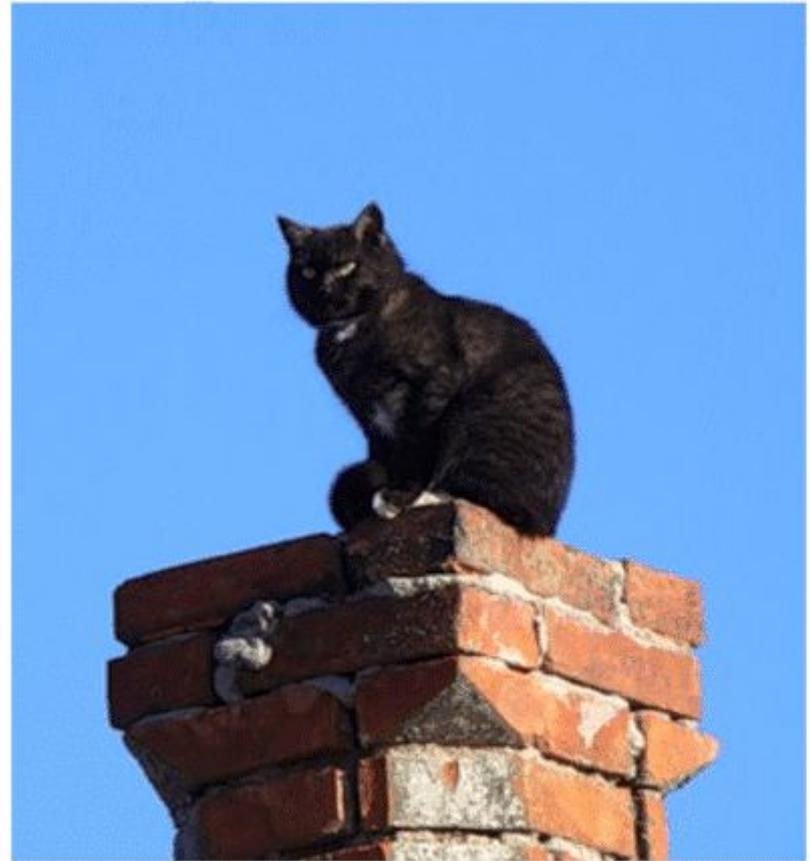


Нанокolonны из алмаза на кремнии
(Электронная микроскопия)

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)

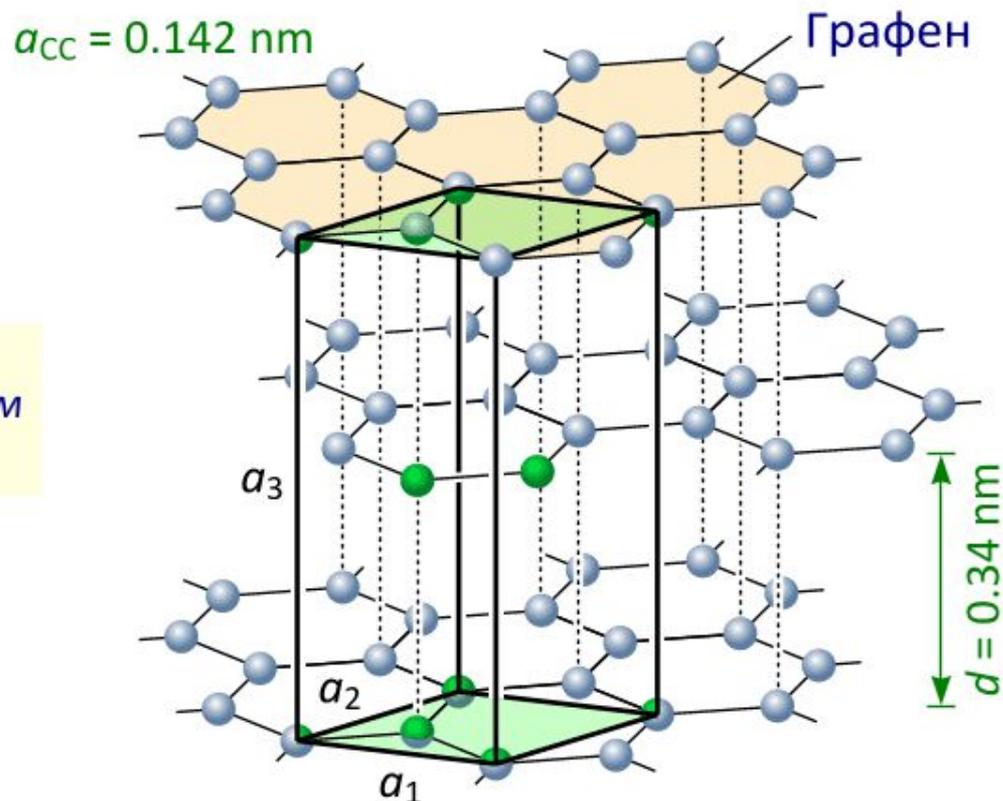
Графит (по В. Далю):
«ископаемое, из которого делается так называемый свинцовый карандаш»

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

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

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

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



Гексагональный графит (по Дж. Берналу)
Элементарная ячейка — призма: содержит 4 атома,

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

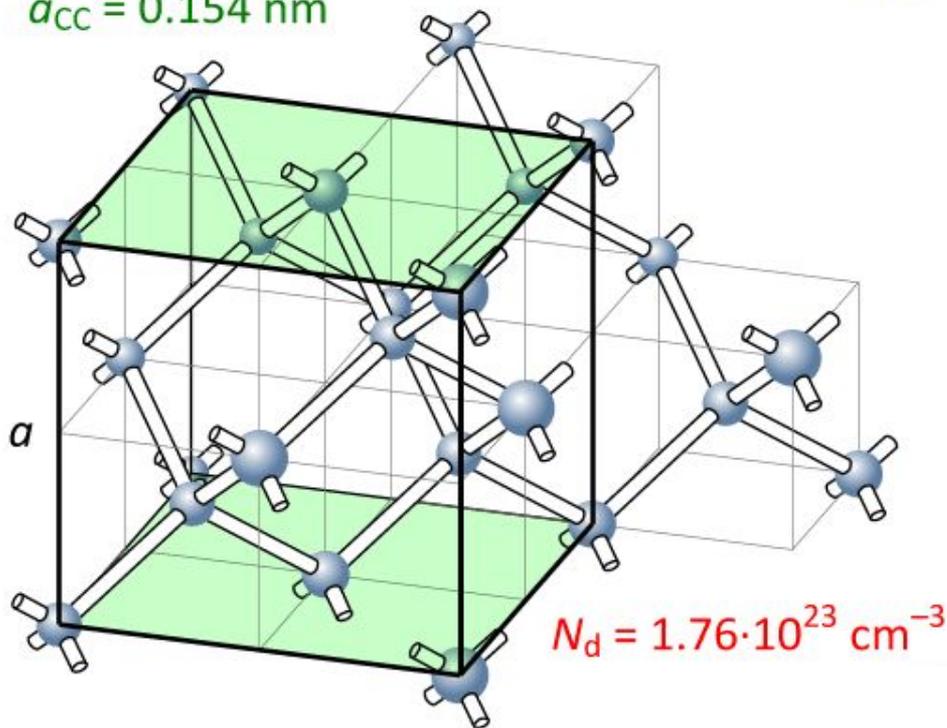
$$a_3 = 2d = 0.6708 \text{ nm}$$

Почему скользит графит?

Кристаллические решетки алмаза и графита

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

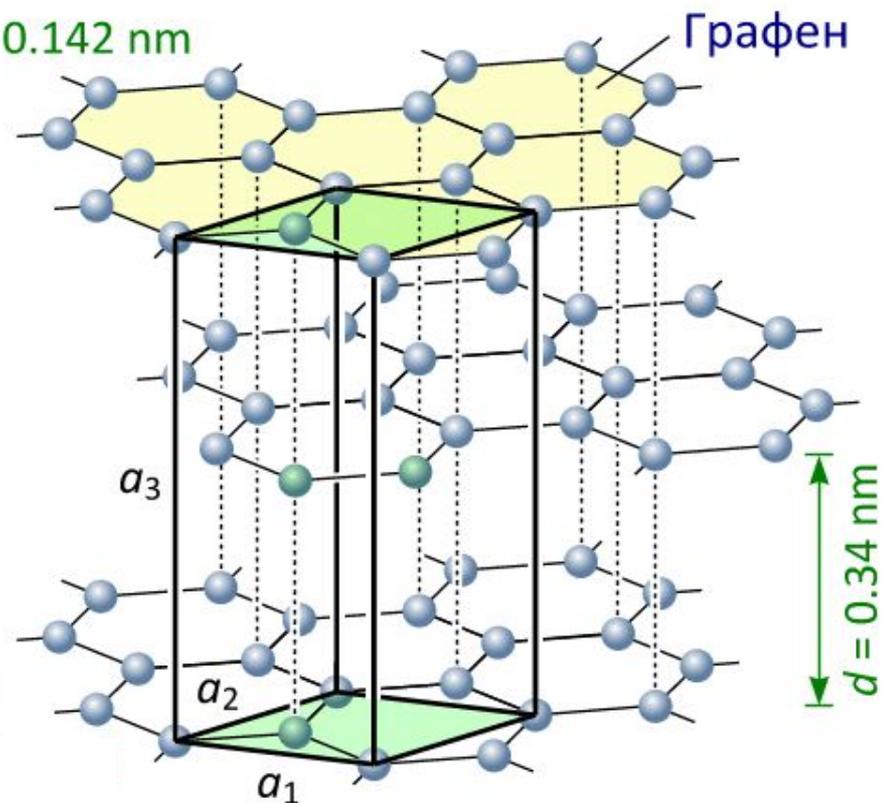
$$a_{\text{CC}} = 0.154 \text{ nm}$$



Кубический алмаз

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

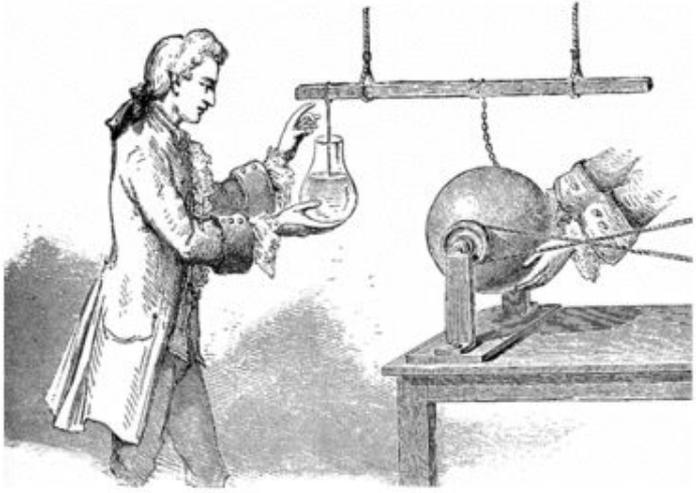
$$a_{\text{CC}} = 0.142 \text{ nm}$$



Гексагональный графит

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

Лейденская банка

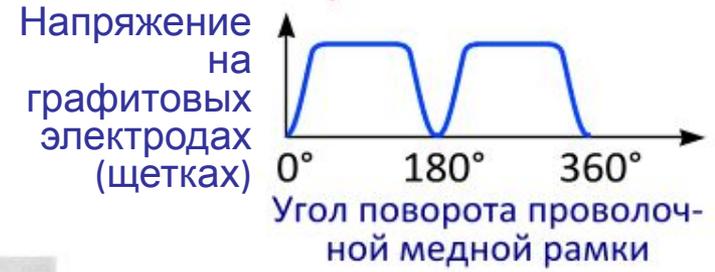
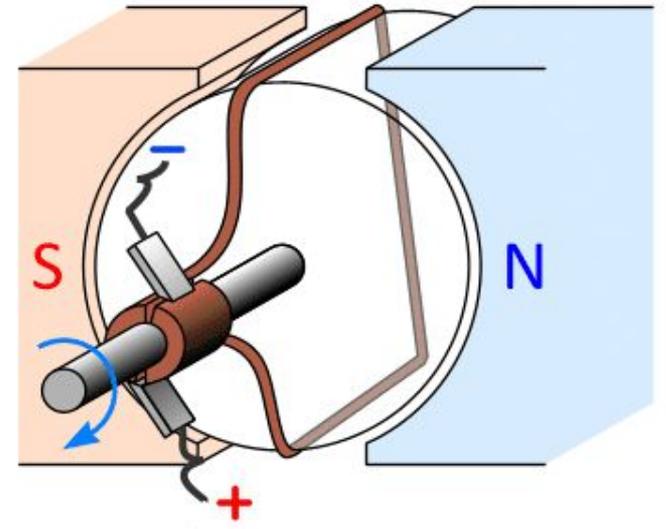


Питер ван Мушенбрук (Лейден, 1745)



Аньош Иштван Йедлик (Будапешт, 1827)

Динамо-машина



Почему скользит графит?

1. Согласно У.Л. Брэггу (1910 г.) 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 г.): 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 В.С. Brodie

On the atomic weight of graphite.

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

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

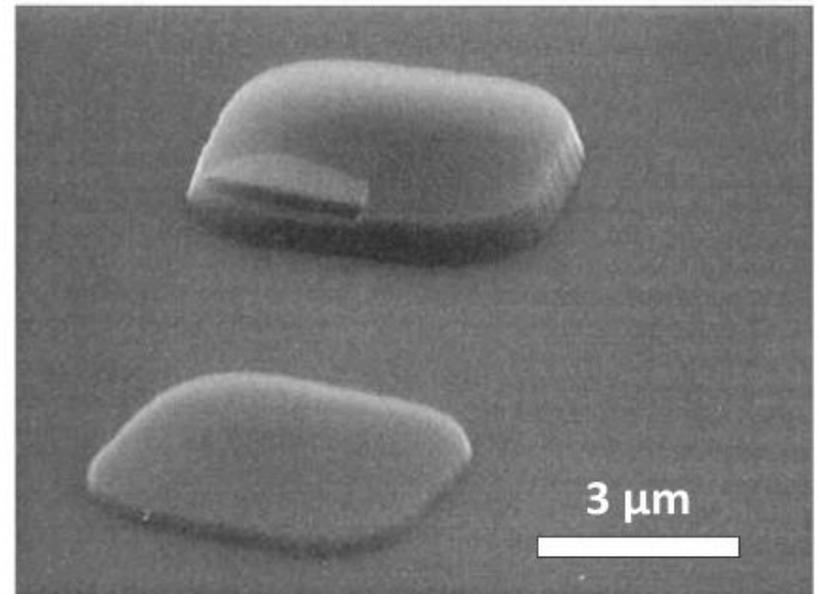
SEM-изображение тонких графитовых пластинок на инженерной поверхности Si

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



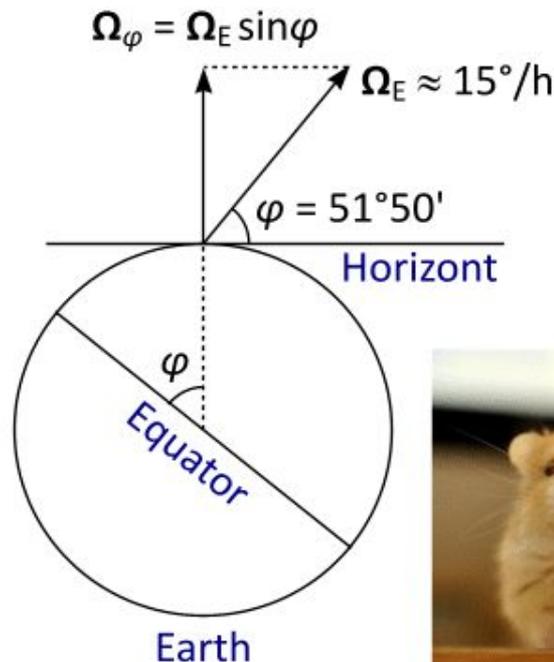
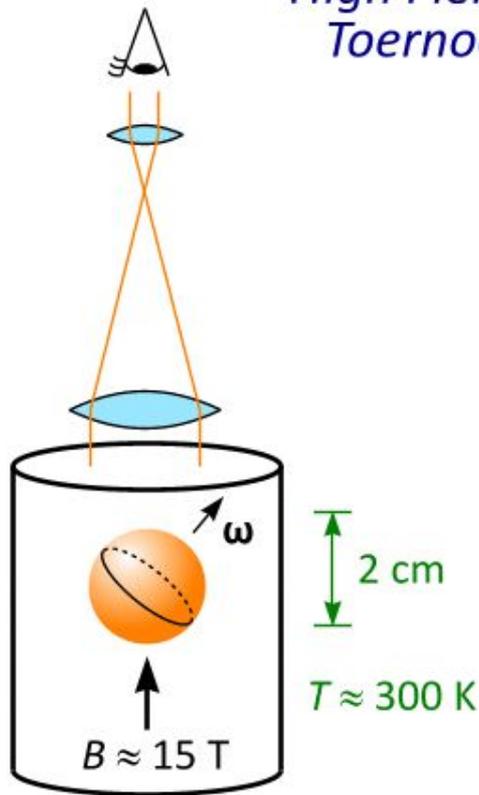
К.С. Новосёлов

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)

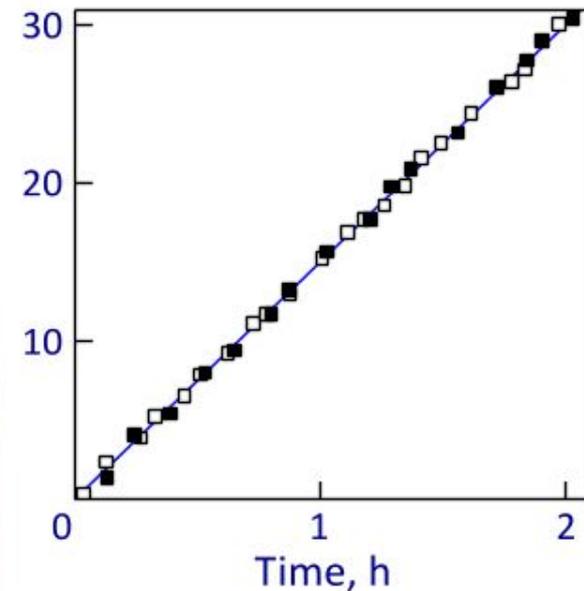
Detection of earth rotation with a diamagnetically levitating gyroscope

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

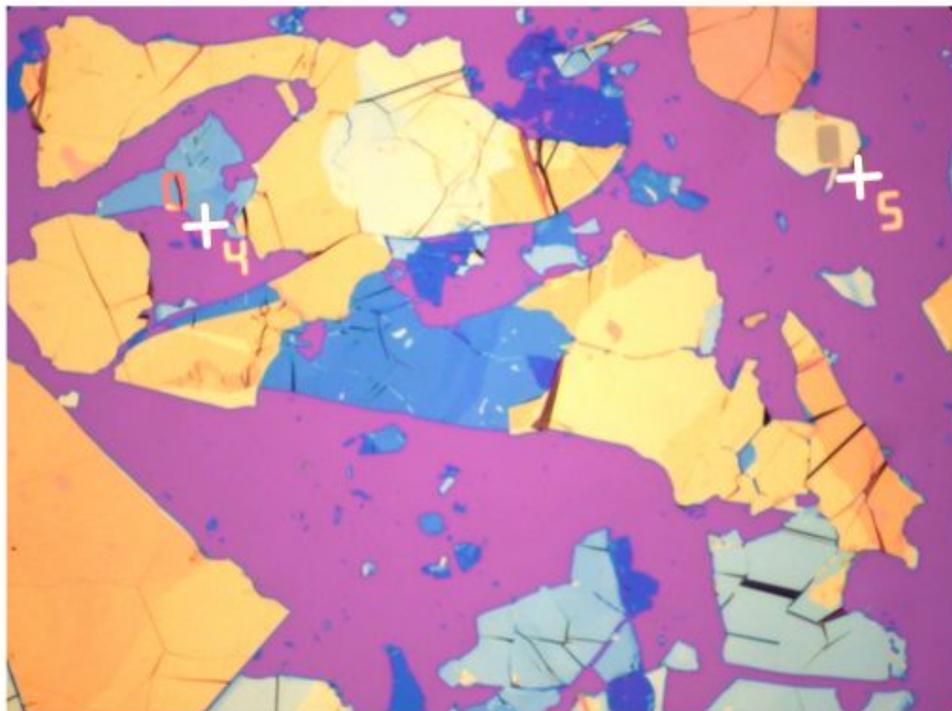
High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen,
Toernooiveld 1, 6525ED Nijmegen, The Netherlands



Rotation angle, degree



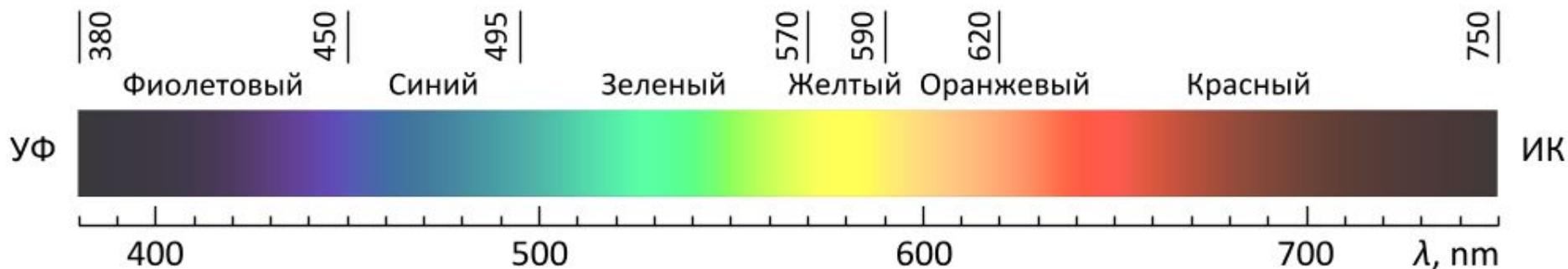
Микромеханическое расслоение графита



Тонкие графитовые чешуйки на поверхности пластины Si/SiO₂ (слой SiO₂ толщиной 300 nm фиолетового цвета).

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

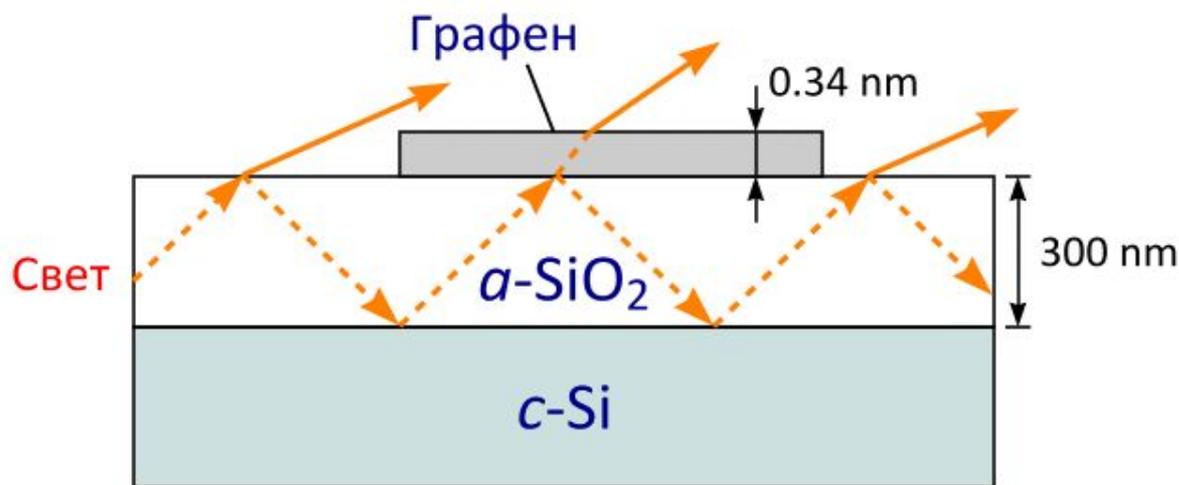
Масштаб задан расстоянием между литографическими отметками (200 μ m)



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

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

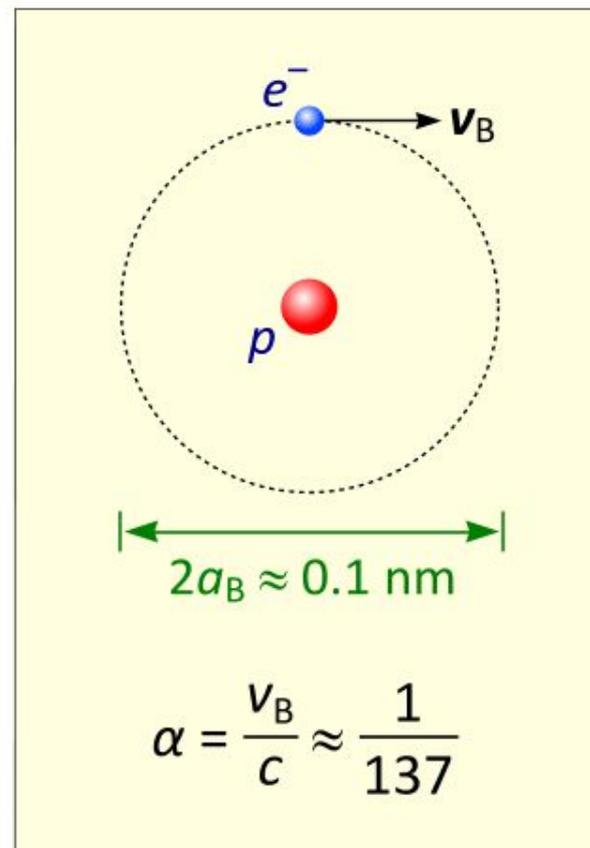
$$T = \left(1 + \frac{e^2}{8\epsilon_0\hbar c}\right)^{-2} \approx 1 - \pi\alpha = 97.7\%$$



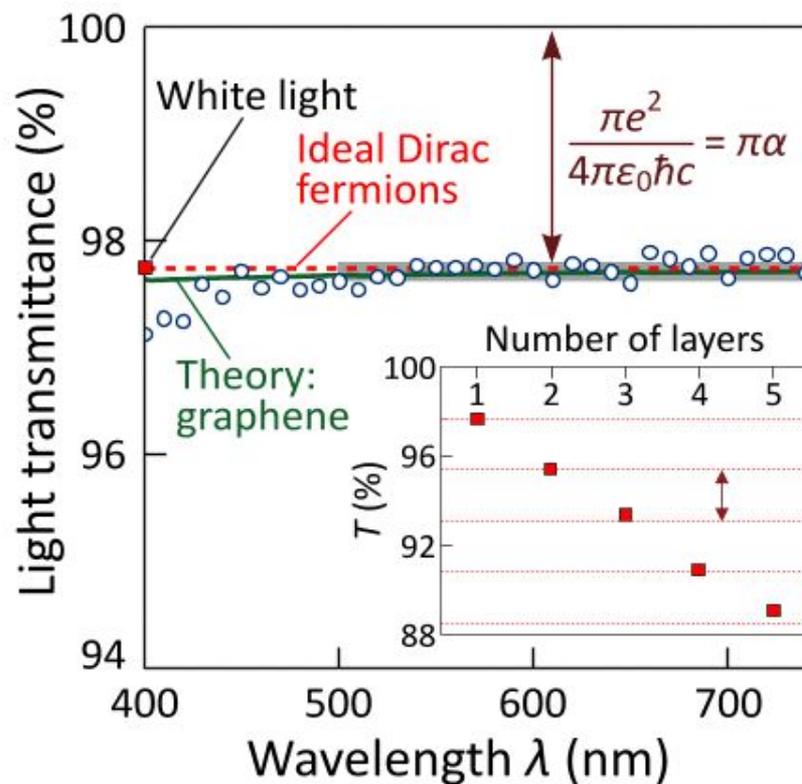
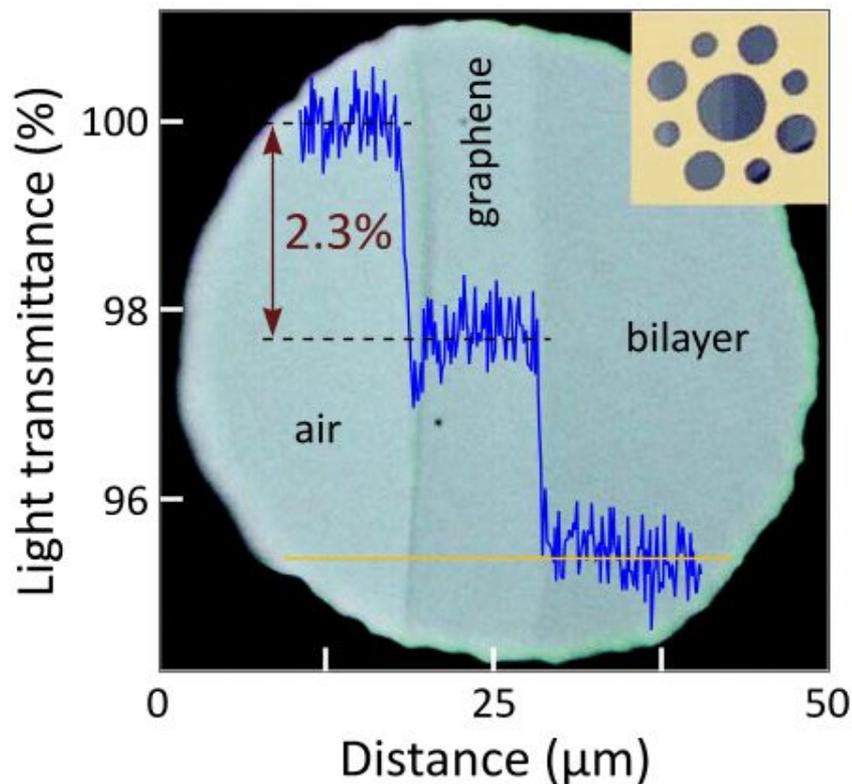
Чешуйка изменяет коэффициент отражения света от границы "аморфный диоксид кремния – воздух" и создает фазовый контраст (до 15%), который позволяет увидеть невооруженным глазом даже однослойный графит — графен

"Что играет для этой задачи роль атома водорода?"

Э. Ферми



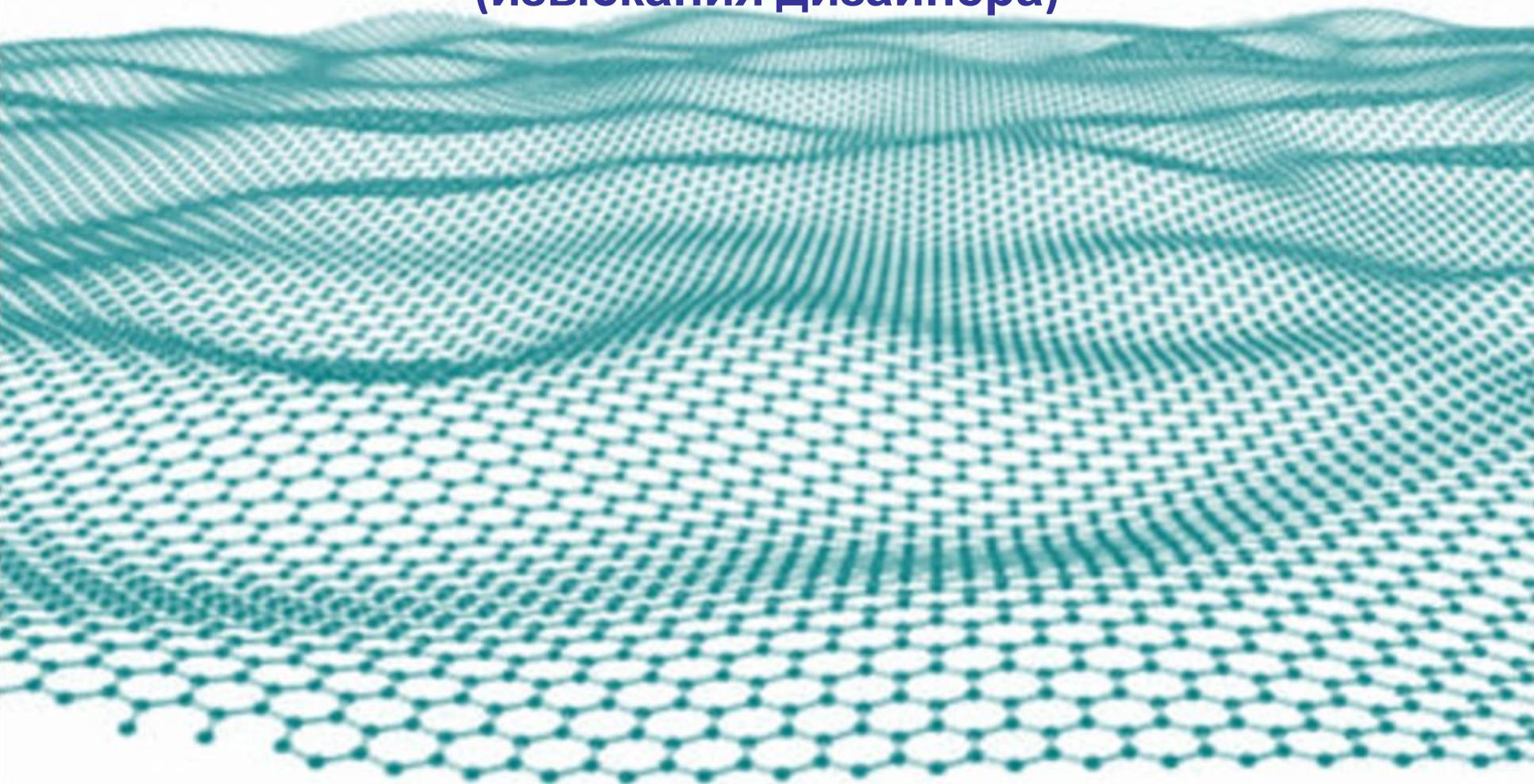
Прозрачность графена определяется постоянной тонкой структуры



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

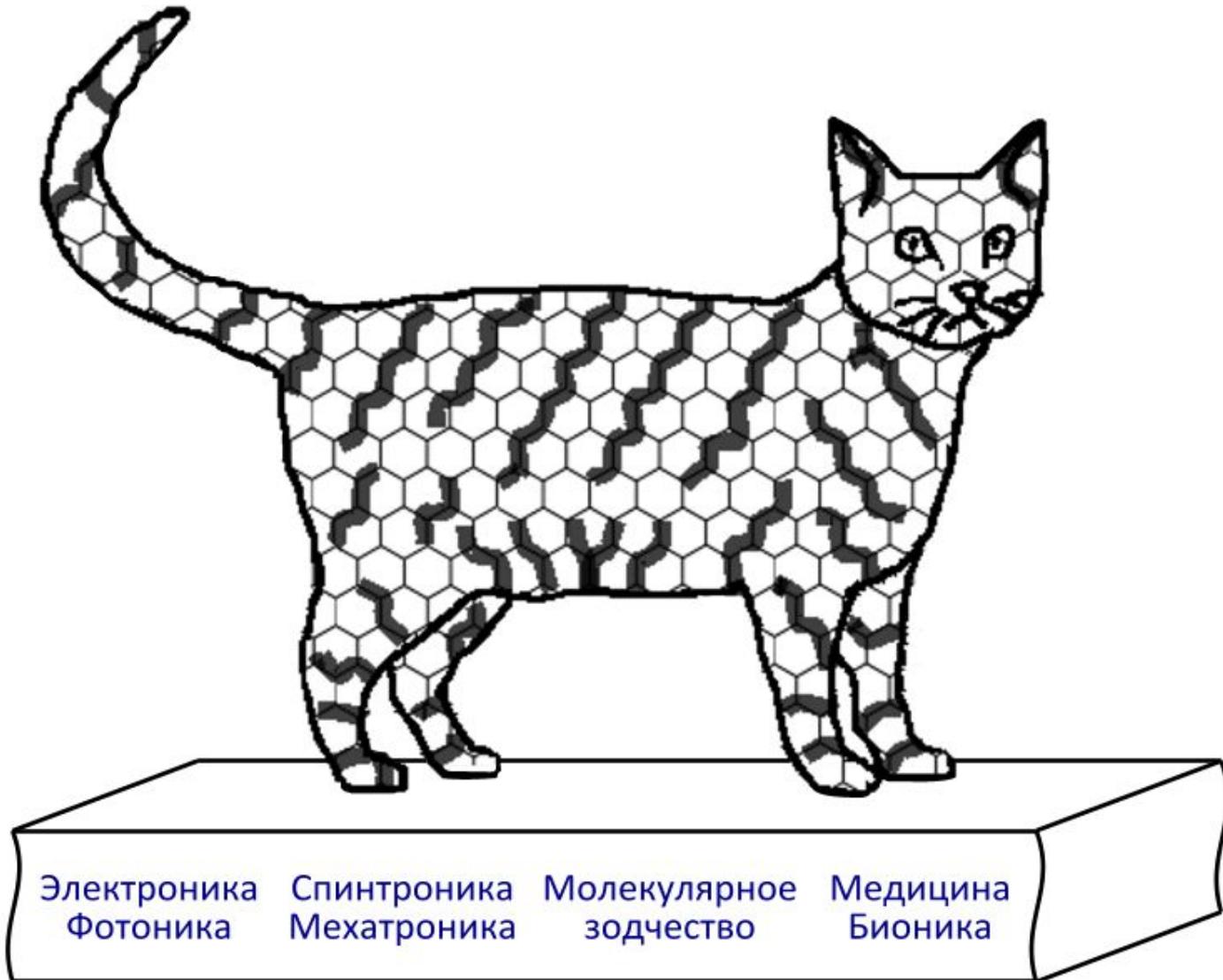
T — коэффициент пропускания света,
 ν — число слоев графена,
 $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) \approx 1/137$ — постоянная тонкой структуры

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

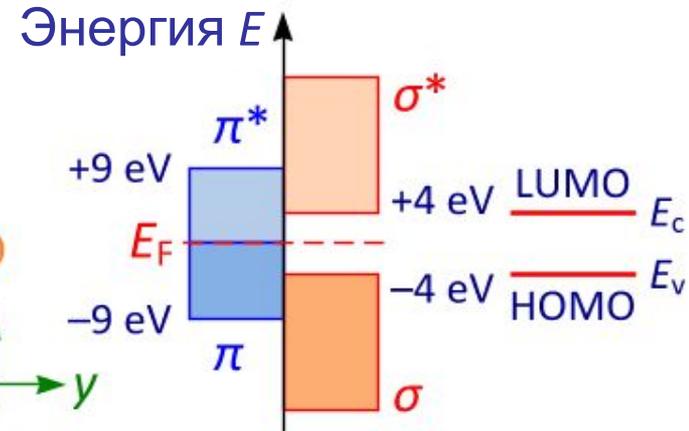
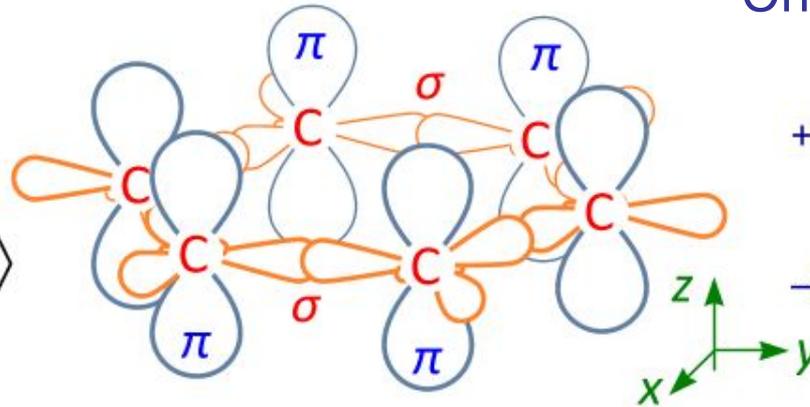


Энергетика химических связей в графене

$$a_{CC} = 0.142 \text{ nm}$$

$$\sigma: |2s\rangle, |2p_x\rangle, |2p_y\rangle$$

$$\pi: |2s\rangle, |2p_z\rangle$$



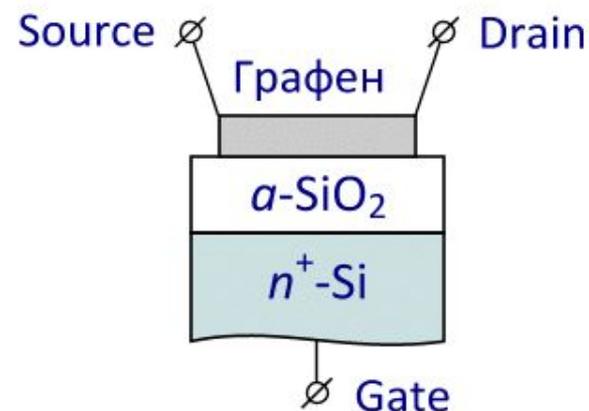
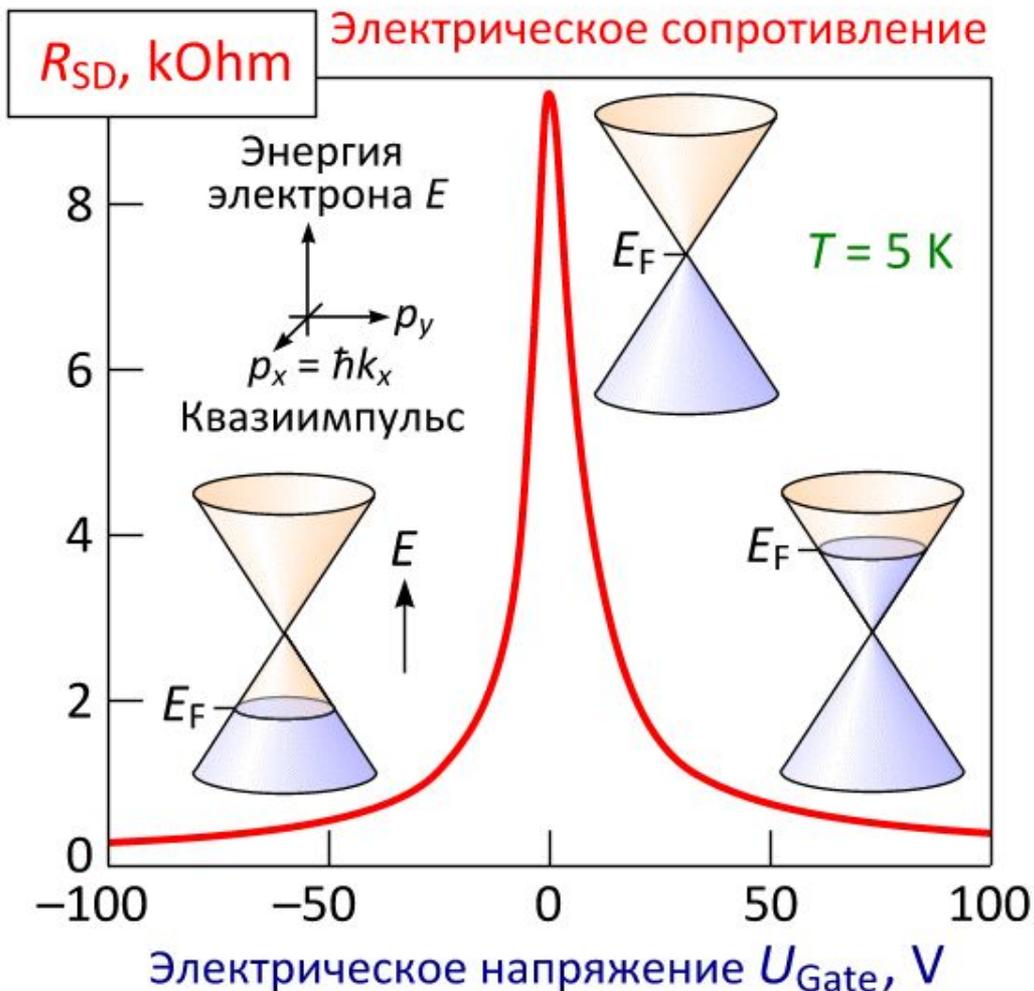
#) Четыре валентных орбитали атома углерода: $2s$, $2p_x$, $2p_y$ и $2p_z$. Орбитали s , p_x и p_y образуют лежащие в графеновой плоскости σ - (связывающие или занятые) и σ^* - (антисвязывающие или незанятые) орбитали, четные по отношению к отражению в плоскости xy . Три σ -связи между атомами углерода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

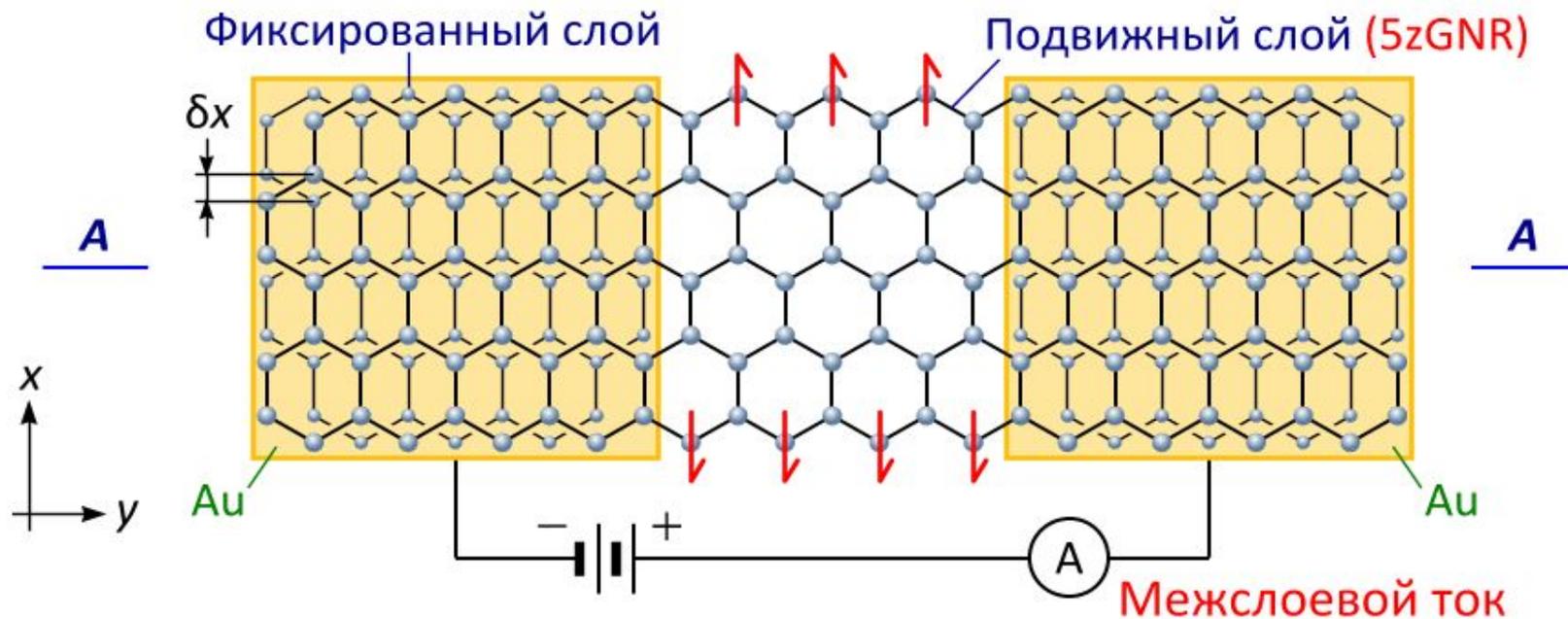
Qubit piano
Klein tunneling



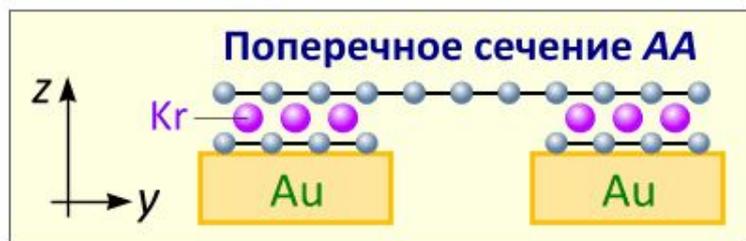
P. Recher, B. Trauzettel.
Quantum dots and spin qubits in graphene.
Nanotechnology, **21**, 302001 (2010).

Нанодинамометр на основе бислоя графена

Квантово-химический расчет + Туннельный гамильтониан Бардина



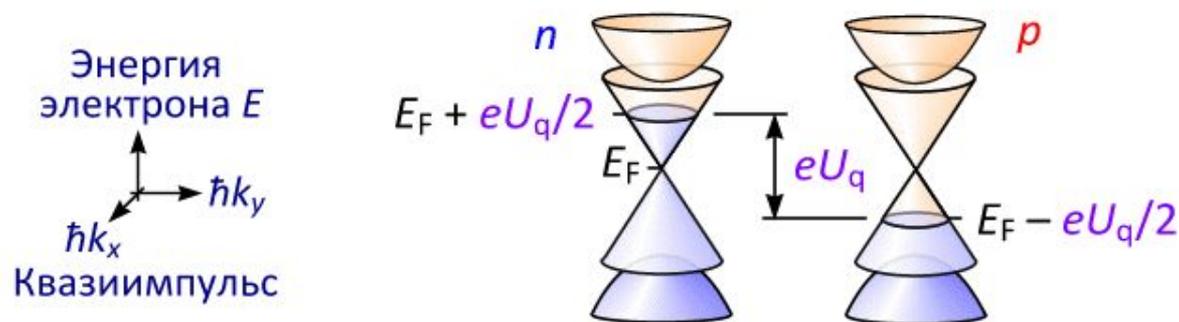
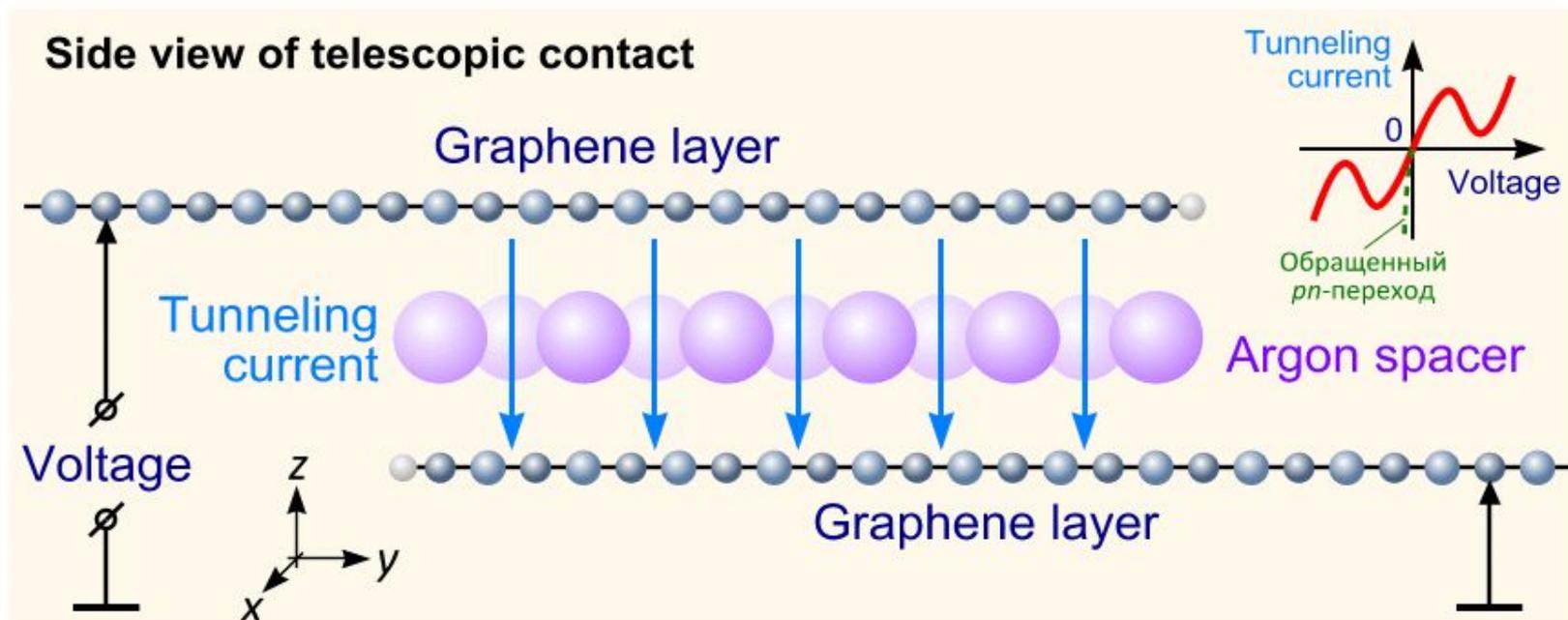
Ван-дер-ваальсовы силы



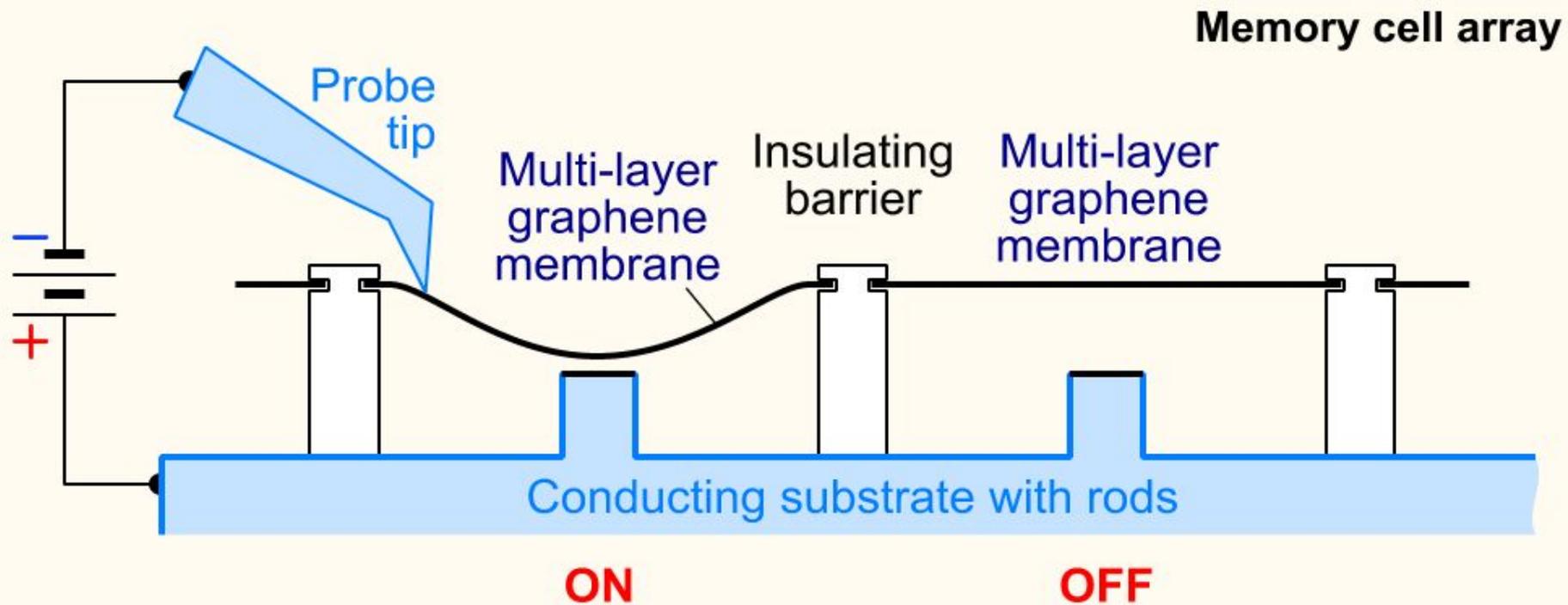
- 1) Измеряемая сила: $10 \mu\text{N} \approx 1 \text{ mg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2$
(площадь перекрытия слоев 10^4 nm^2)
- 2) Half-metal: AFM \leftrightarrow FM

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

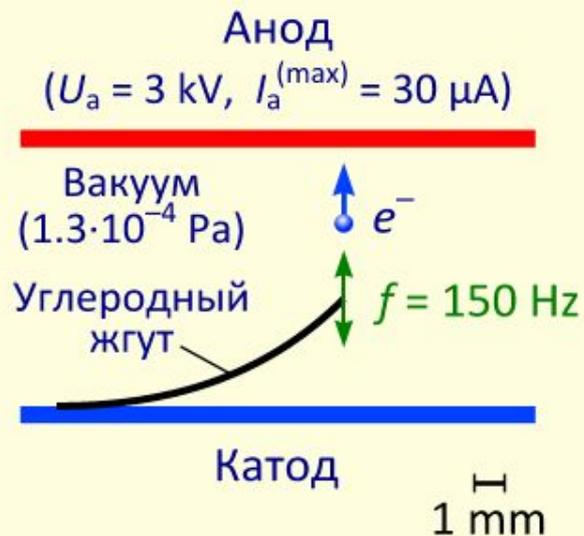
A.I. Siahlo, A.M. Popov, N.A. Poklonski, Yu.E. Lozovik, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich.

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).

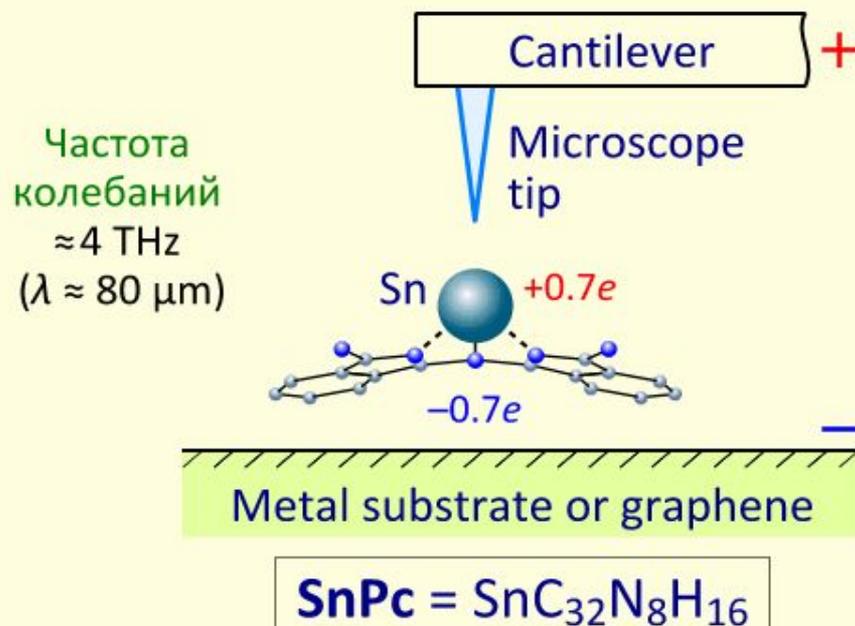
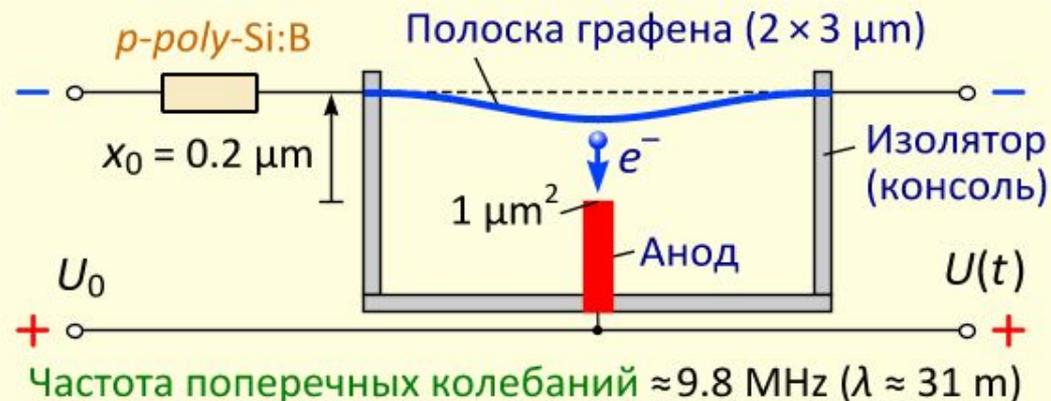
Электромеханические генераторы

Полевая эмиссия электронов из торца углеродного волокна



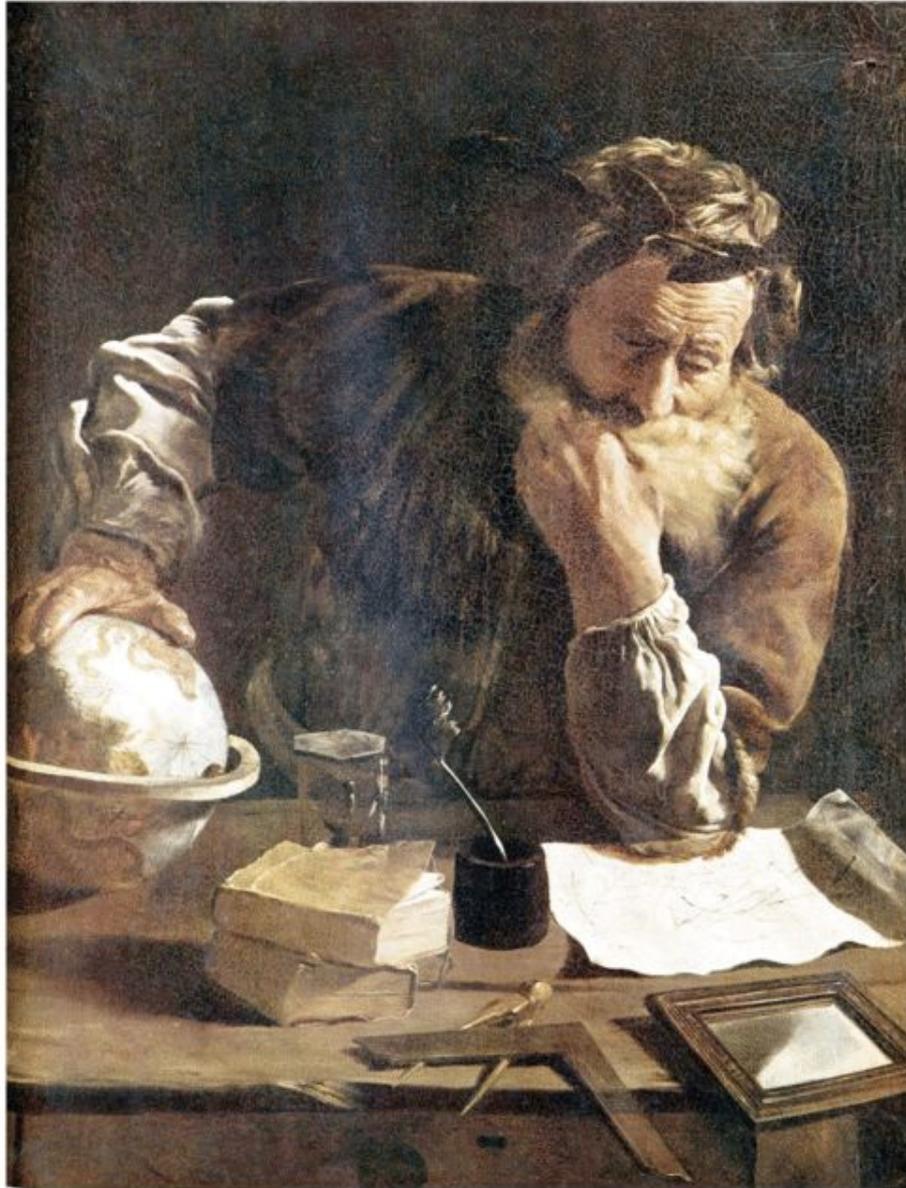
1. V.I. Kleshch *et al.* Carbon, **48** (13), 3895–3900 (2010).
2. М.Д. Бельский *и др.* ЖТФ, **80** (2), 130–137 (2010).

Глубина модуляции тока 100%
«Время жизни» устройства $\approx 5 \text{ min}$



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)

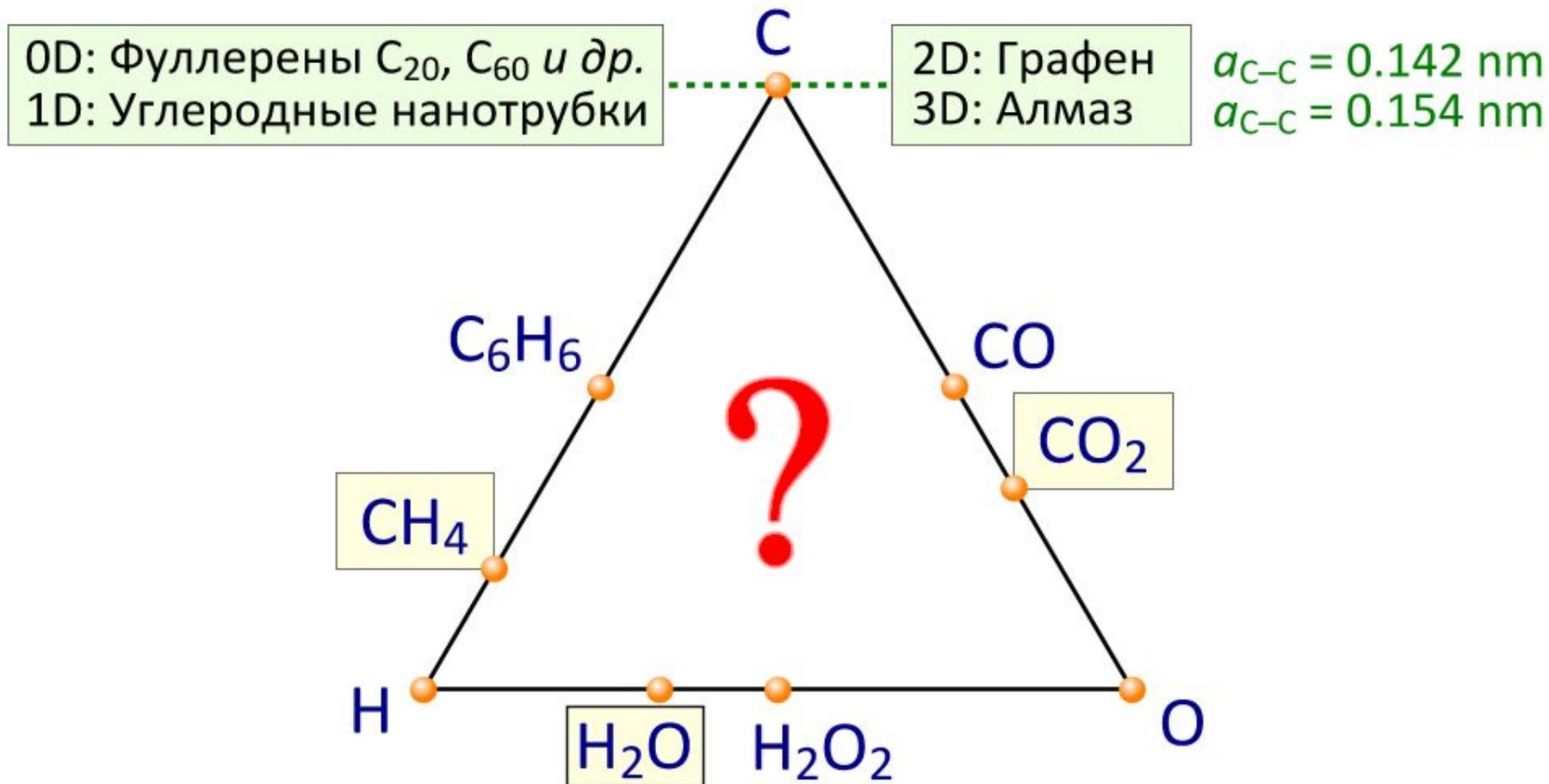


Albrecht Durer, Melencolia, 1514



**Пожар
1976**

C–O–H треугольник для инженерии

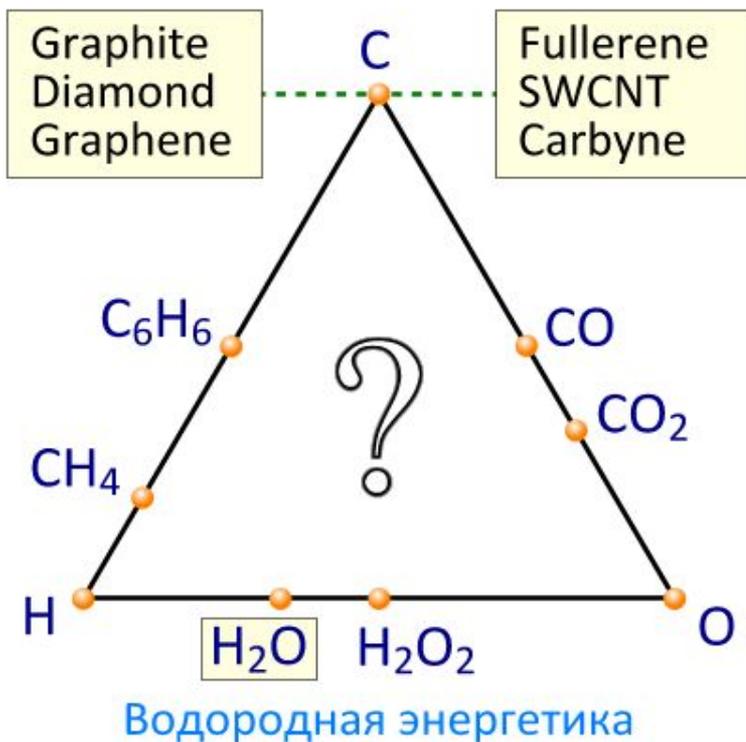


Энергии связи молекул (kJ/mol):

H_2 — 432; O_2 — 494; C_2 — 603

(1 kJ/mol = 10.36 meV на частицу)

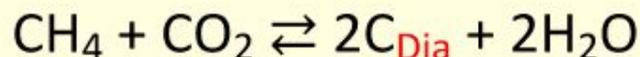
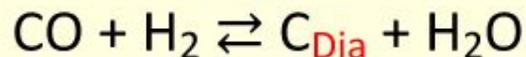
1. D.A.C. Brownson, D.K. Kampouris, C.E. Banks. *Graphene electrochemistry: fundamental concepts through to prominent applications*. Chem. Soc. Rev., **41** (21), 6944–6976 (2012).
2. А.К. Ребров. *Возможности газофазного синтеза алмазных структур из смесей водорода и углеводородов*. УФН, **187** (2),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



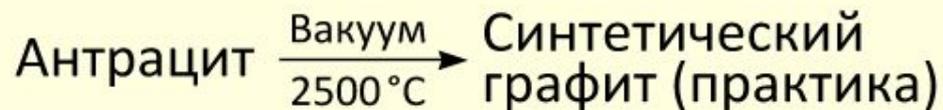
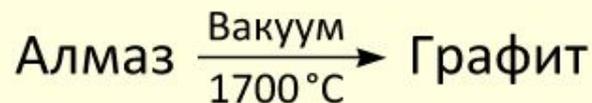
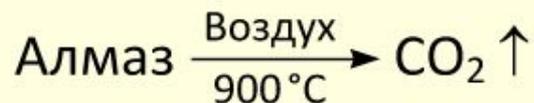
Энергии связи молекул (kJ/mol):

H₂ — 432; O₂ — 494; C₂ — 603

Синтез алмаза из газовой фазы



Разложение алмаза



(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

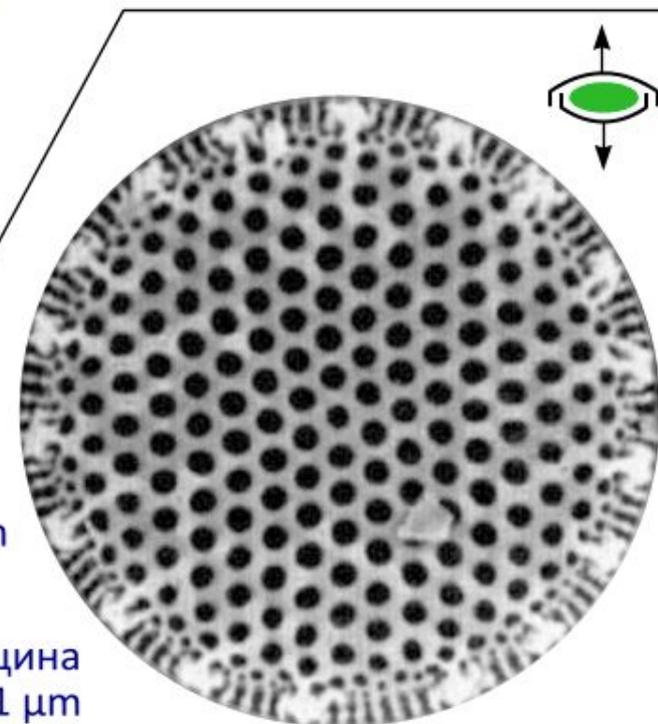


Филлотаксис. Ряды ближайших чешуй шишки сосны образуют два семейства спиралей: левовинтовые и правовинтовые. Число левых и число правых спиралей являются соседними в последовательности чисел Фибоначчи: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, ... Эта закономерность является эмпирической и ее причины неясны.

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 SiO₂-структур

Диатомея (от гр. *diatomē* — рассечение надвое; одноклеточная водоросль) формирует внешнюю твердую оболочку самосборкой (молекула за молекулой) из SiO₂, растворенного в H₂O при $T \approx 300$ К. (SiO₂ + 2H₂O = H₄SiO₄ — кремниевая кислота; в морской воде [Si] — около 6 ppm.)



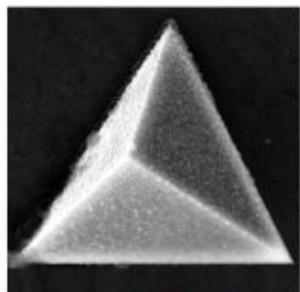
1 μm

Толщина
0.1–1 μm

1. M.L. Green, E.P. Gusev, R. Degraeve, E.L. Garfunkel. *Ultrathin (< 4 nm) SiO₂ 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).

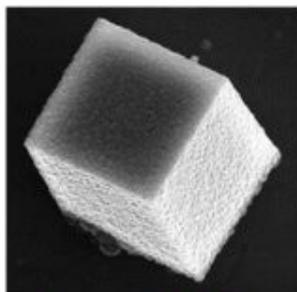
Микрокристаллы: 5 тел Платона

тетраэдр



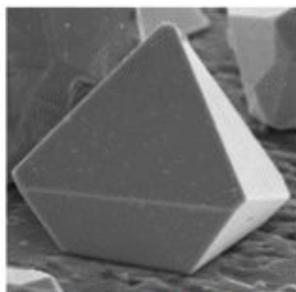
5 μm

куб



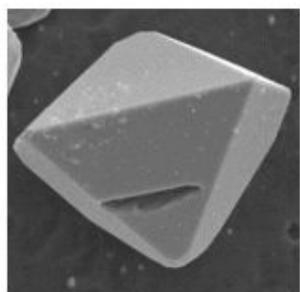
3 μm

октаэдр



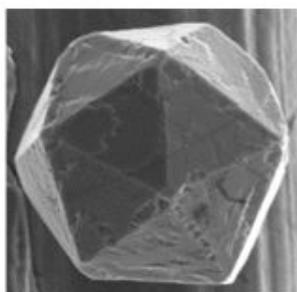
8 μm

октаэдр



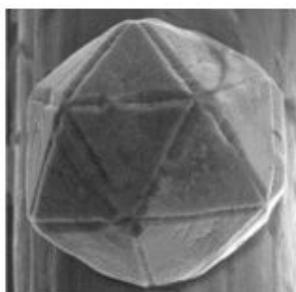
6 μm

икосаэдр



10 μm

икосаэдр



10 μm

додекаэдр



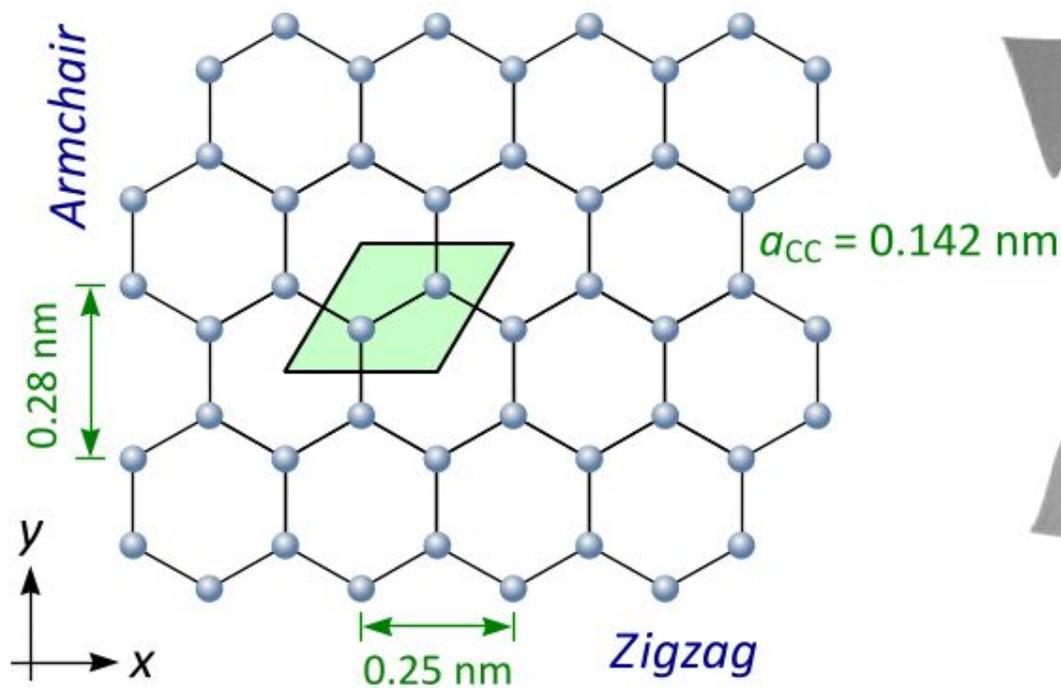
6 mm

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

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

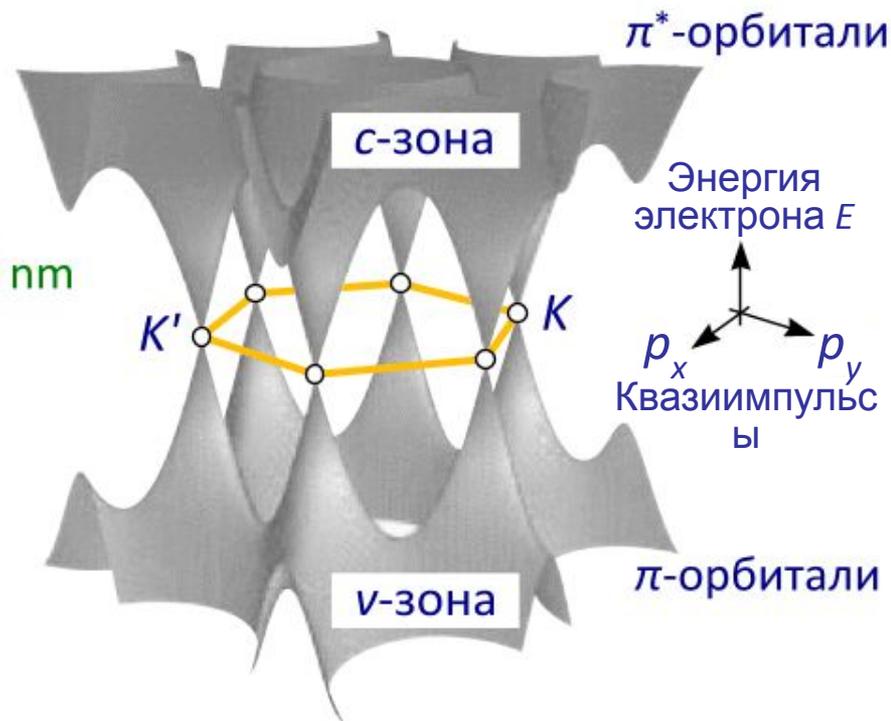
Графен: кристаллическая структура и одно-электронная энергетическая зонная диаграмма

Двумерная углеродная сетка



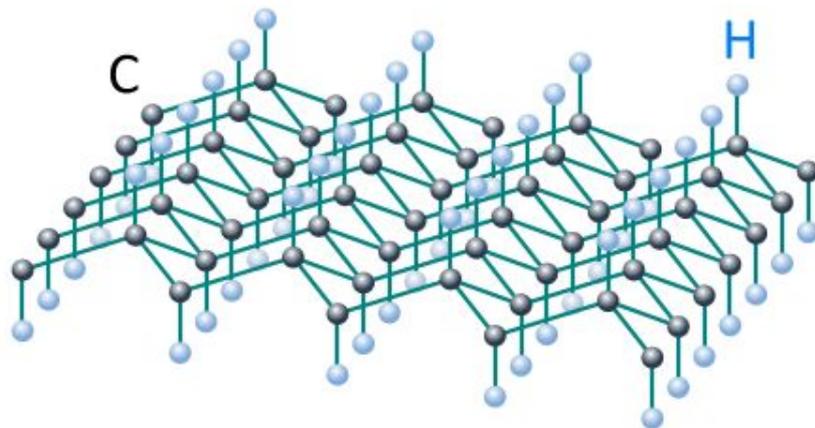
Полупроводник с нулевой запрещенной зоной (энергетической щелью) для π -электронов и нулевой эффективной массой и электрона s -зоны, и дырки v -зоны

Зонная структура $E(k)$ графена



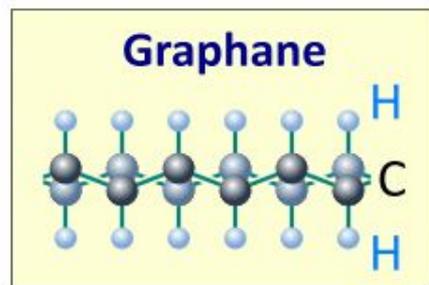
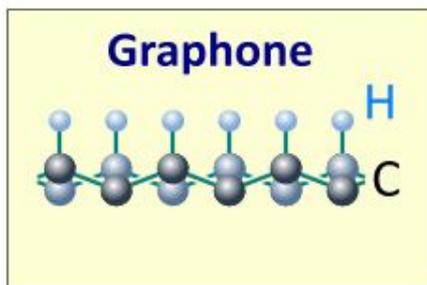
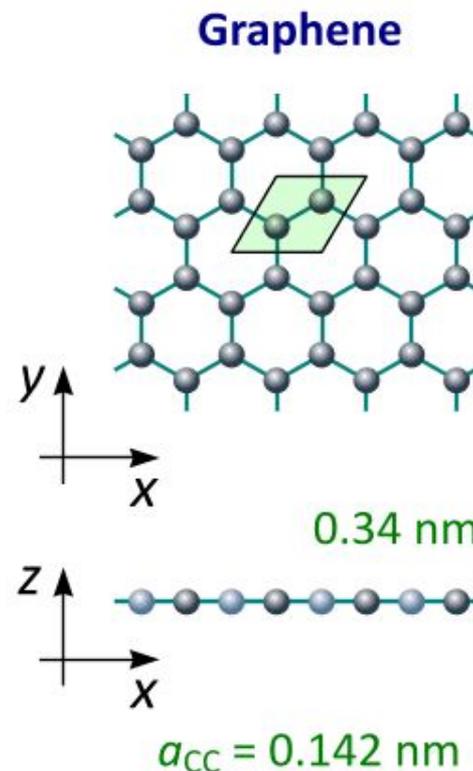
В точках Дирака (K -точках) электроны (и дырки — электронные вакансии) ведут себя как релятивистские частицы со скоростью Ферми $v_F \approx c/300 \approx 10^6 \text{ m/s}$, где c — скорость света в вакууме, $E_F = \hbar k v_F$ — энергия Ферми

Графан = Графен + Н — аналог трехмерного алмаза



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

C—C-связи в графене sp^3 -гибридизованы



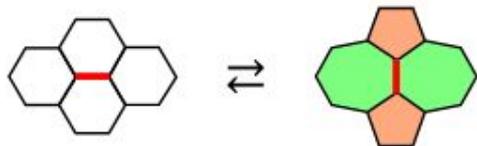
Графон — графен, пассивированный водородом с **одной** стороны

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).

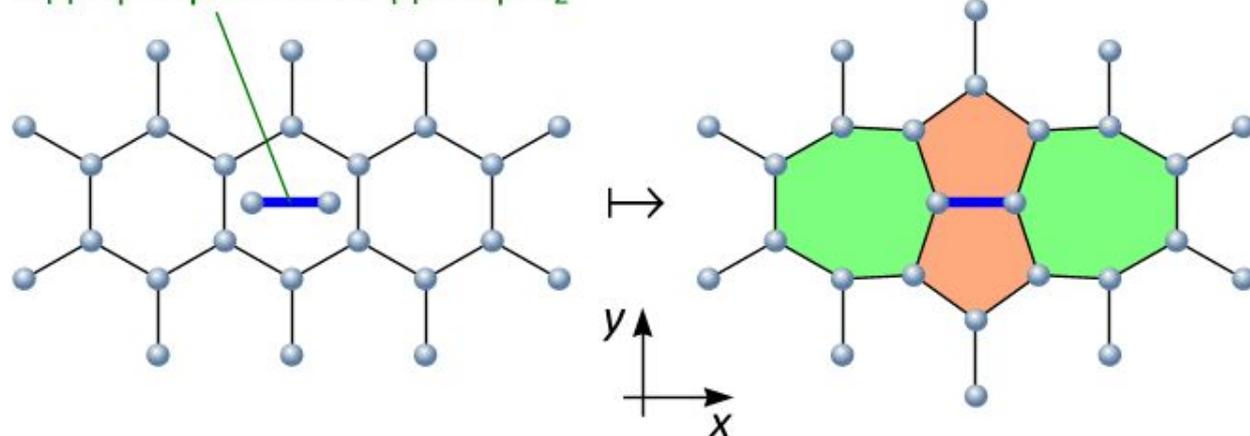
Выпуклость на графеновой плоскости

Перегруппировка
с образованием дефекта
Стоуна–Уоллеса

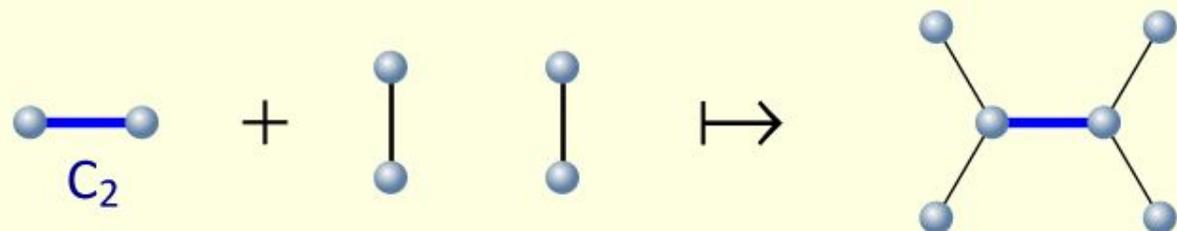
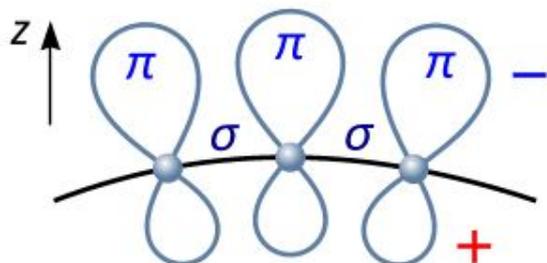


Возникновение
и исчезновение
собственных дефектов
в графене

Адсорбированный димер C_2



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

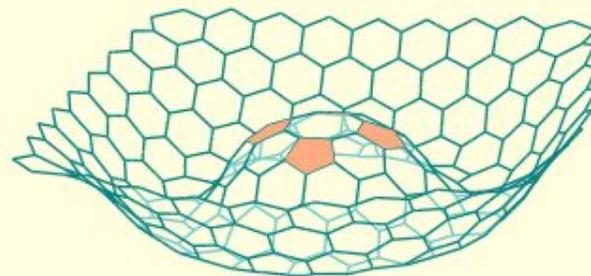
Возможно "выворачивание" выпуклости, т. е. переход выступающих из графеновой плоскости атомов с одной стороны на другую. При наличии у такой выпуклости электрического дипольного момента, выворачивание может сопровождаться излучением (или поглощением) одного фотона.

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).