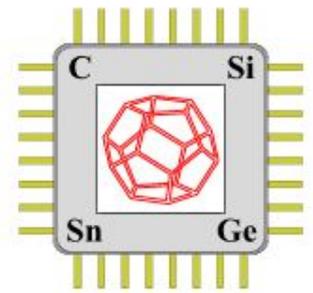




Белорусский государственный университет
Физический факультет

Кафедра физики полупроводников и наноэлектроники
пр. Независимости 2, Минск, Беларусь



Электричество в Беларуси

к 170-летию со дня рождения Я.О. Наркевича-Иодко

проф. Н.А. Поклонский

e-mail: poklonski@bsu.by; poklonski@tut.by

Лекция в школе им. К. Крапивы и минском Планетарии, 23 декабря 2017 г.

План лекции

1. *Пролог: фрагменты истории.
Память о прошлом дает льготы
в процессах выживания и размножения*
2. *Элементы электрографии, электромеханики
и электроники*
3. *Одиночные и консолидированные
0D-, 1D-, 2D-, 3D-системы*
4. *Эпилог. Немного о перспективах
и ассоциированных с ними гипотезах:
техника воздухоплавания со сфинксами*

Пролог

Термин «**электричество**» (янтарность) ввел в научный оборот Уильям Гильберт (1600).

Отто фон Герике (1663) обнаружил, что существуют силы электрического **притяжения** и силы электрического **отталкивания**.

Стивен Грей (1729) открыл, что металлы проводят электричество, а дерево, фарфор и стекло — не проводят.

Шарль Дюфе (1733) открыл существование двух видов электрического заряда: «стеклянный» — **положительный** и «смоляной» — **отрицательный**.

Бенджамин Франклин (1752) создал первый громоотвод (молниеотвод).

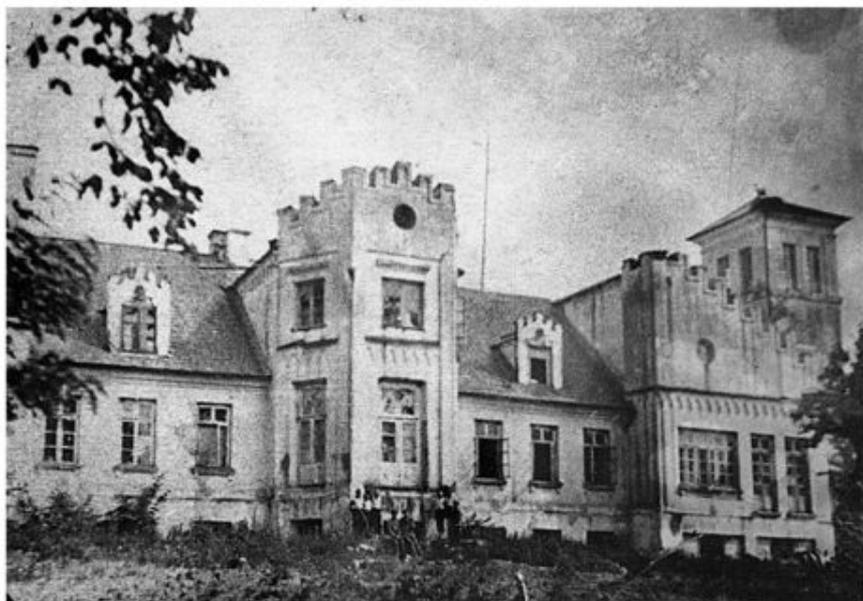
Герман фон Гельмгольц (1881) высказал идею **дискретности электрического заряда**, интерпретируя законы электролиза, открытые Майклом Фарадеем (1833).

Первая электростанция в г. Минске (1895).

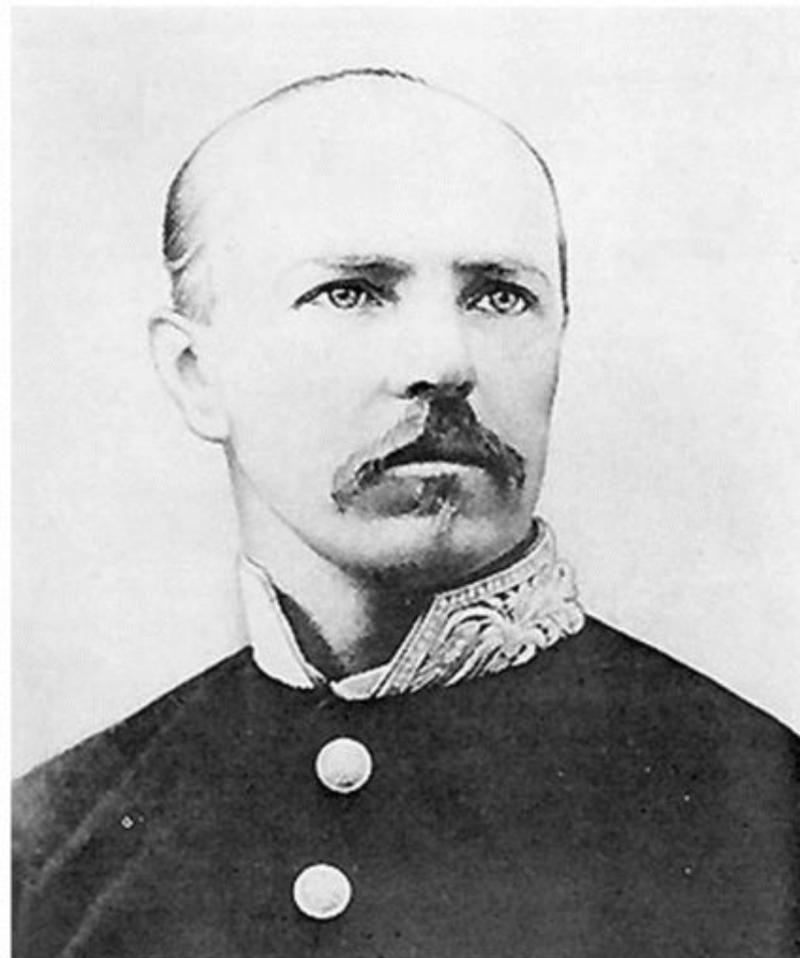
1. Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. *Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией*. УФН, **170** (7), 753–769 (2000).
2. А.А. Красновский, В.В. Никандров. *Могли ли полупроводники участвовать в эволюции?*

Якуб Оттонович Наркевич-Иодко (1847–1905)

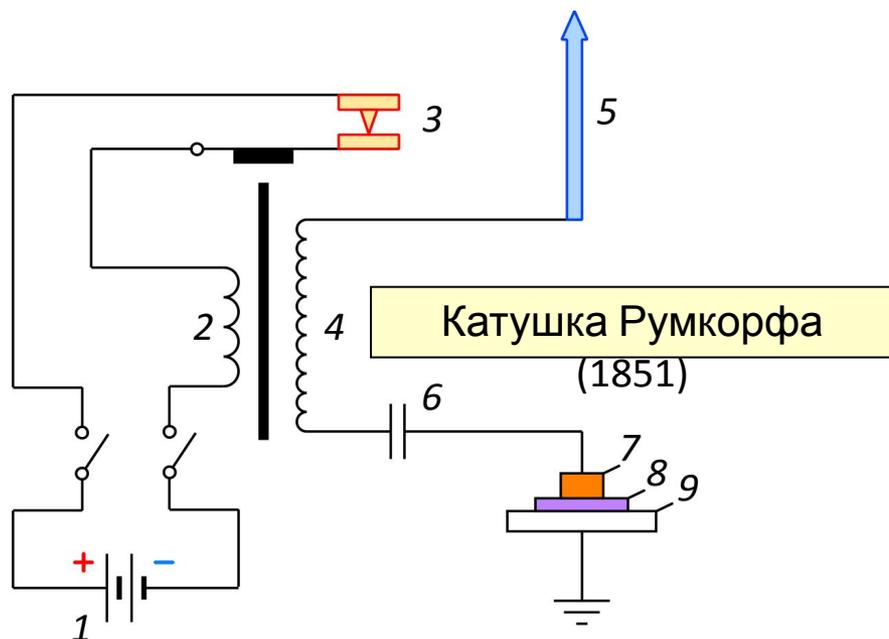
- Приоритет в детектировании радиоволн от грозового разряда
- Использование электромагнитного излучения газоразрядной плазмы для визуализации объектов



Наднёман, 1940



Якуб Оттонович Наркевич-Иодко

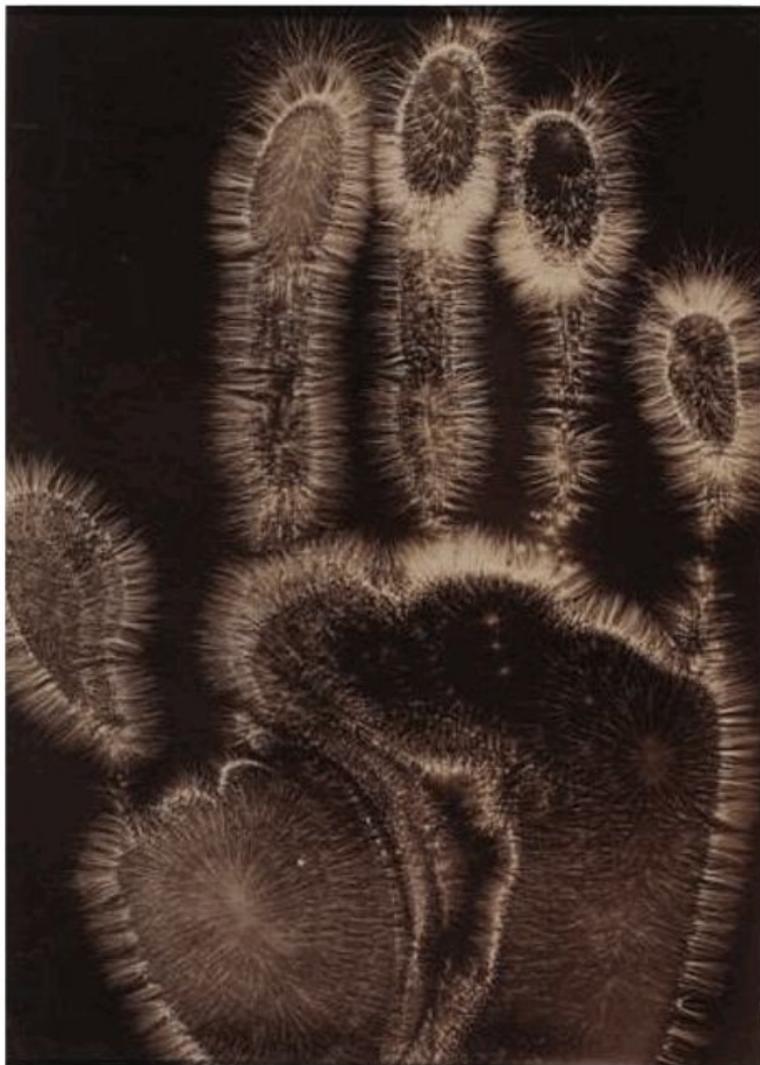


Электрическая схема эксперимента Я.О. Наркевича-Иодко:

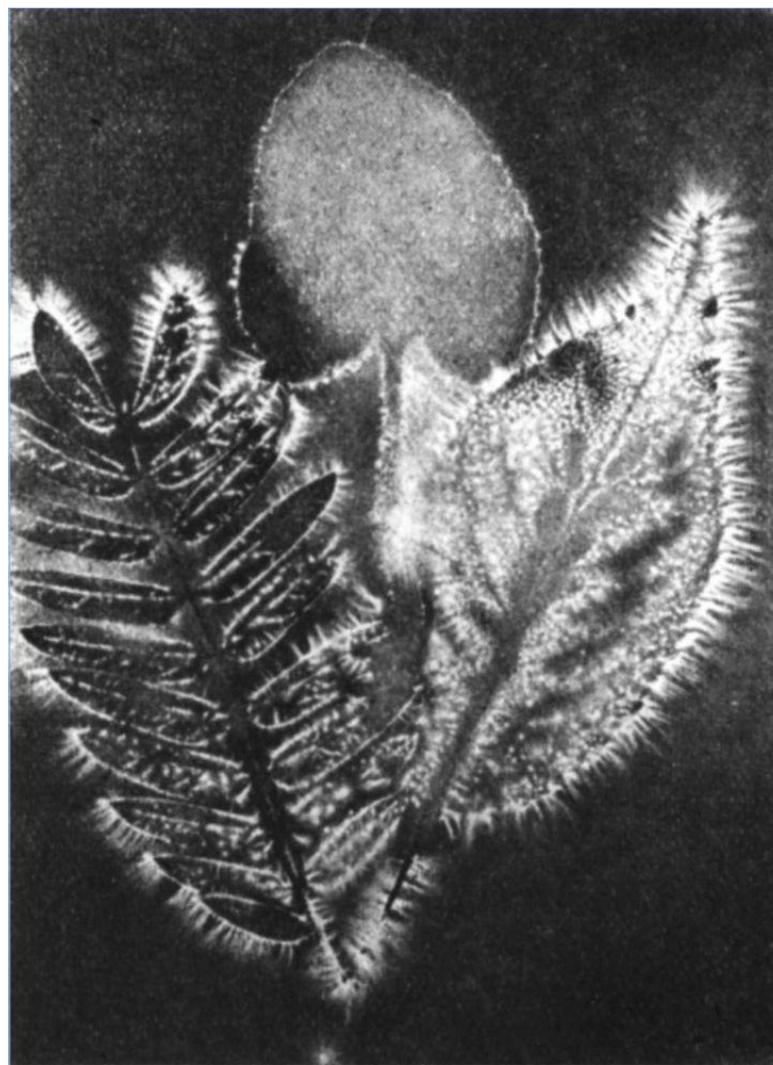
- 1 — гальванический элемент,
- 2 — первичная низковольтная обмотка катушки Румкорфа,
- 3 — прерыватель электромеханический,
- 4 — вторичная высоковольтная обмотка катушки Румкорфа,
- 5 — острое металлическое,
- 6 — конденсатор (пробирка),
- 7 — объект,
- 8 — пластинка фоточувствительная,
- 9 — подкладка диэлектрическая



В.П. Грыбкоўскі, В.А. Гапоненка, У.М. Кісялёў.
Прафесар электраграфіі і магнетызму:
Якуб Наркевіч-Ёдка
 (Мінск: Навука і тэхніка, 1988) 72 с.



Электрографический снимок руки человека, полученный Я.О. Наркевичем-Иодко (1899)

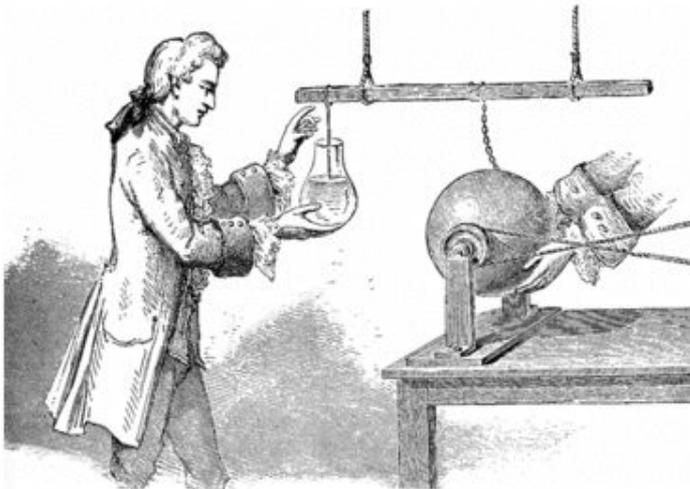
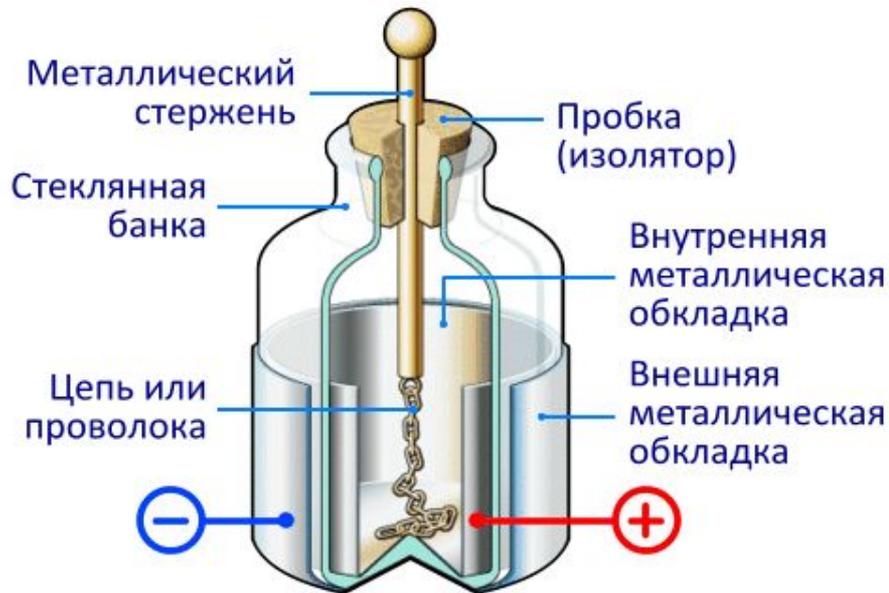


Электрографическое изображение листьев

Кирлиан-эффект (1939).

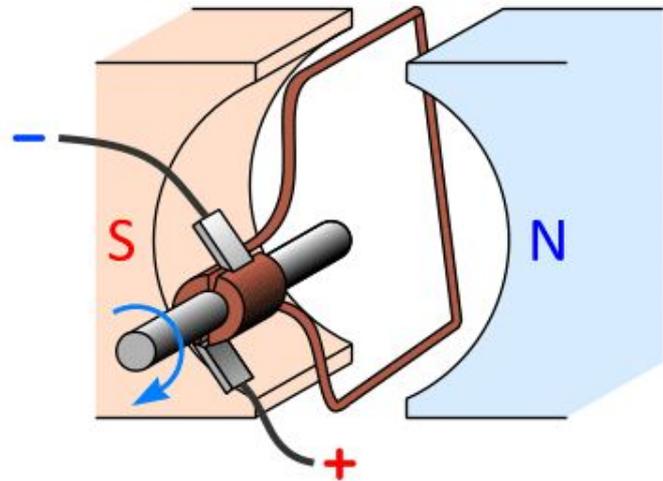
В.Х. Кирлиан, С.Д. Кирлиан. *В мире чудесных разрядов* (М.: Знание, 1964) 40 с.

Лейденская банка

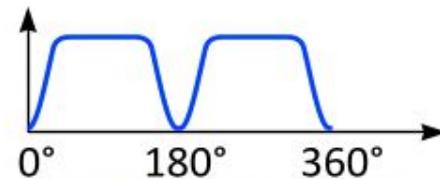


Питер ван Мушенбрук
(Лейден, 1745)

Динамо-машина



Электрическое напряжение на графитовых электродах (щетках)



Угол поворота рамки из медной проволоки

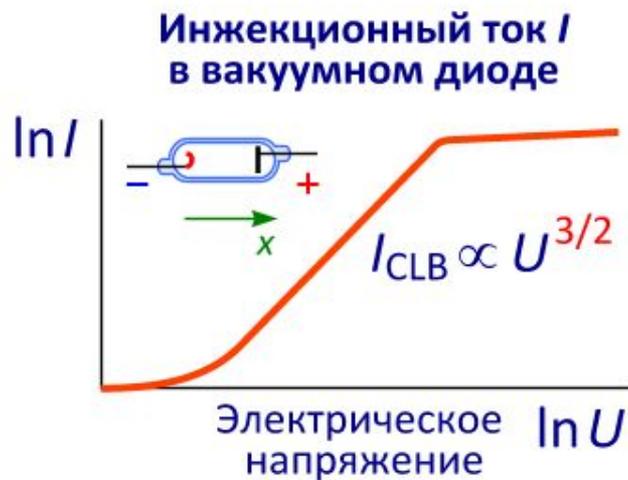
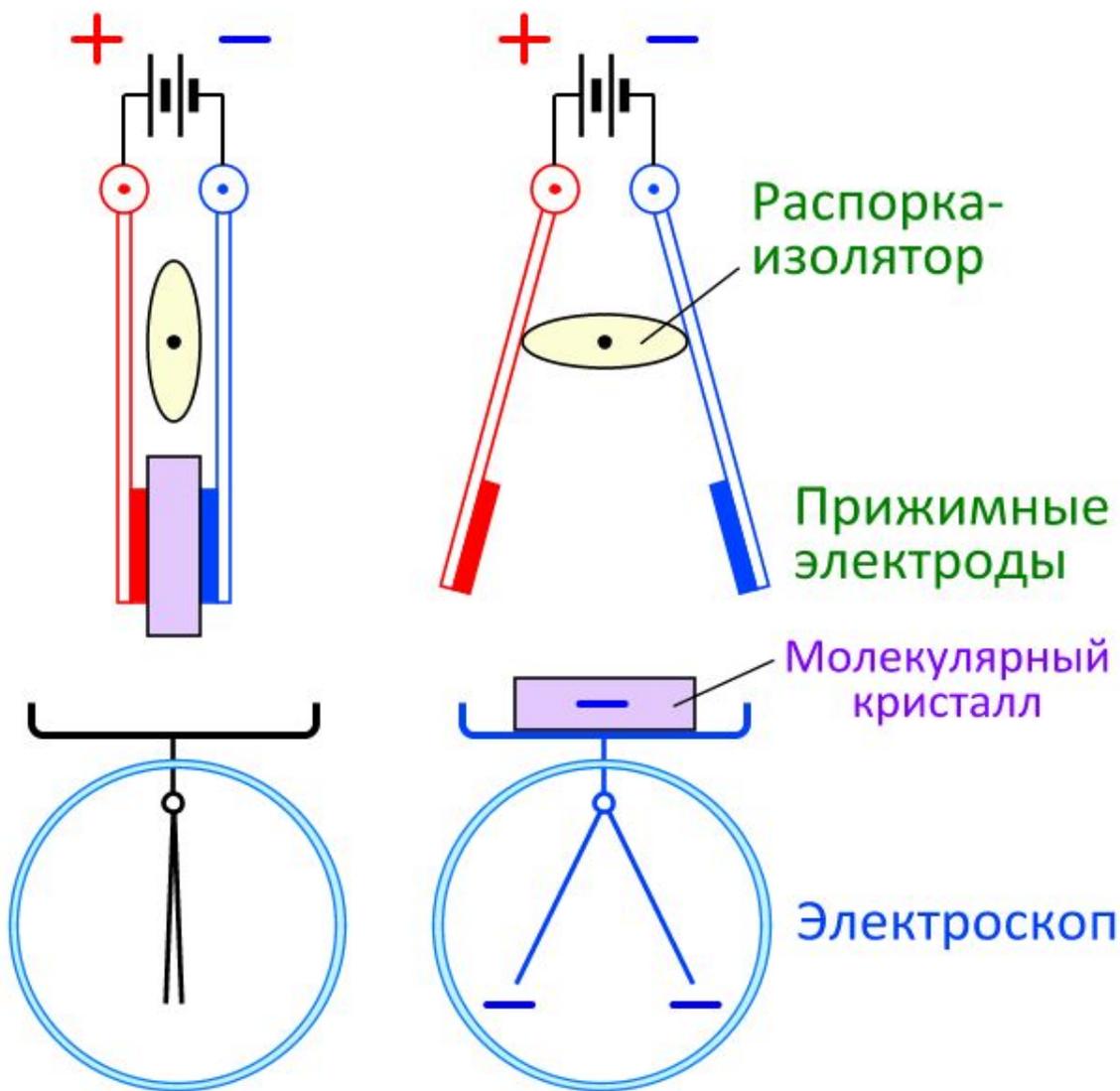


Аньош Иштван Йедлик
(Будапешт, 1827)

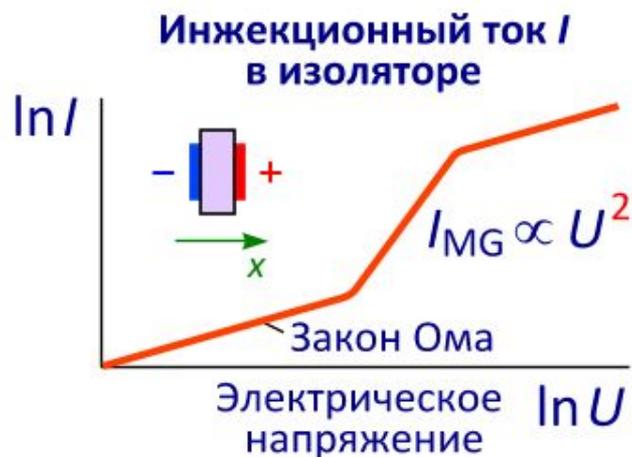
Почему скользит графит?

Минерал серого цвета с металлическим блеском (Англия, 1564).

Инжекция электронов в диэлектрик и вакуум



Плотность тока $J = en(x)v(x)$

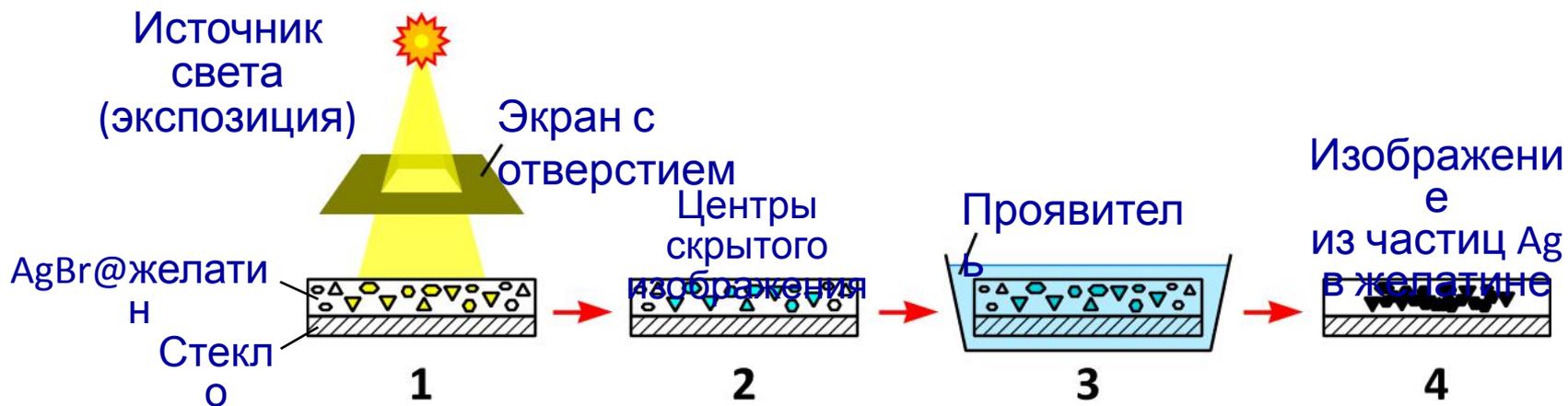


1. М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973) 416 с.

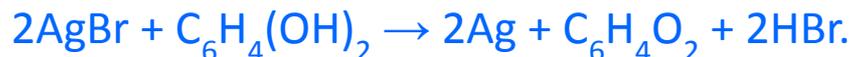
2. В.Ф. Елесин. *К теории прохождения тока через идеальный изолятор*. ЖЭТФ, **147** (1), 132–141 (2015).

Фотографическая пластинка (А. де Сен Виктор, 1847)

9



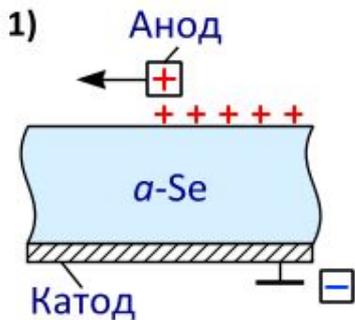
Фотографируемое изображение проецируется на фотоматериал **1**. В засвеченных кристал-литах AgBr образуются центры скрытого изображения **2**. Эти центры представляют собой кластеры из атомов Ag. Далее, фотоматериал помещается в проявитель (гидрохинон) **3**, обеспечивающий медленное протекание реакции:



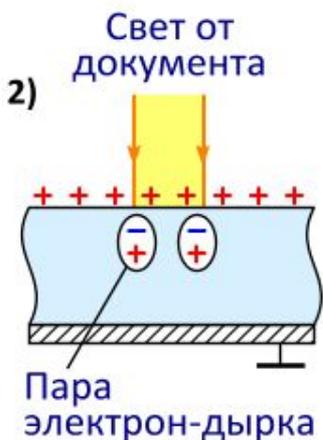
Реакция идет гораздо быстрее в засвеченных местах, где и получаются частицы метал-лического серебра размерами 0.3–3 мкм, которые сильно поглощают свет **4**. Незасвечен-ные кристаллиты AgBr удаляются обработкой в растворе тиосульфата натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Серебро (почернение фотоматериала) образуется на засвеченных участках. В итоге полу-чается негативное изображение объекта.

1. В.С. Гурин. *Фотографический процесс*. Энциклопедия для школьников и студентов. В 12 т. Т. 4. Мир техники / под общ. ред. Н.А. Поклонского (Минск: Беларусь. Энцикл. імя П. Броўкі, 2012) С. 183–184.
2. М.В. Красинькова, Б.Я. Мойжес. *Биполярны и преобразование солнечной энергии*. ФТП, **24** (11), 1934–1942 (1990).
3. А.Г. Яковлев, В.А. Шувалов. *Физическая стадия разделения зарядов при фотосинтезе*. УФН, **106** (6), 507–525 (2016).

Ксерографический процесс (ч. Карлсон, 1938)



1) Анод в виде нити движется в темноте параллельно поверхности селенового стекла (α -Se) и положительно заряжает её ионами воздуха посредством **коронного разряда**. В итоге ионы воздуха и отрицательно заряженный катод создают внутри селенового стекла электростатическое поле (как в плоском заряженном конденсаторе).

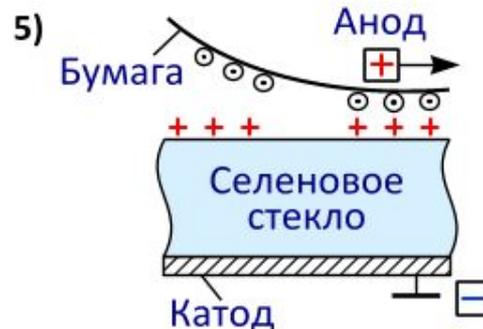
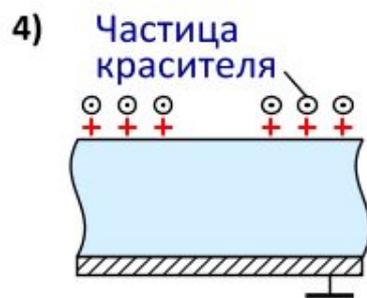
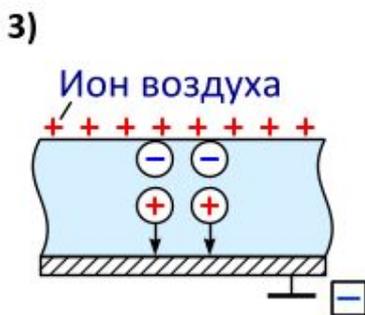


2) На поверхность α -Se проецируют оптическое изображение копируемого документа. Исходящие от светлых областей оригинала фотоны при поглощении в селеновом стекле создают электроны и дырки (электронные вакансии).

3) Под действием электростатического поля внутри слоя α -Se электроны дрейфуют к ионам воздуха на поверхности α -Se 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 тёмная область. Дырки дрейфуют к катоду и частично нейтрализуют его отрицательный заряд.

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

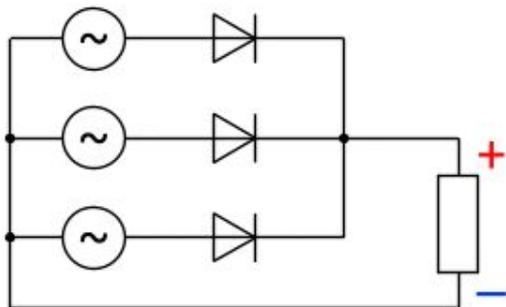
5) На α -Se кладут лист бумаги. При втором прохождении анода краситель переполаризуется и переносится с селенового стекла на бумагу. Полученное на бумаге изображение закрепляют. Остаточные заряды на α -Se и бумаге нейтрализуют.



Владимир Фёдорович Миткевич

(1872–1951)

- Метод окисления азота воздуха электродуговым способом
- Впервые предложил применять в линиях высокого напряжения **расщепленные провода** для уменьшения потерь на коронный разряд (1910)
- Схема трёхфазного однополупериодного выпрямителя

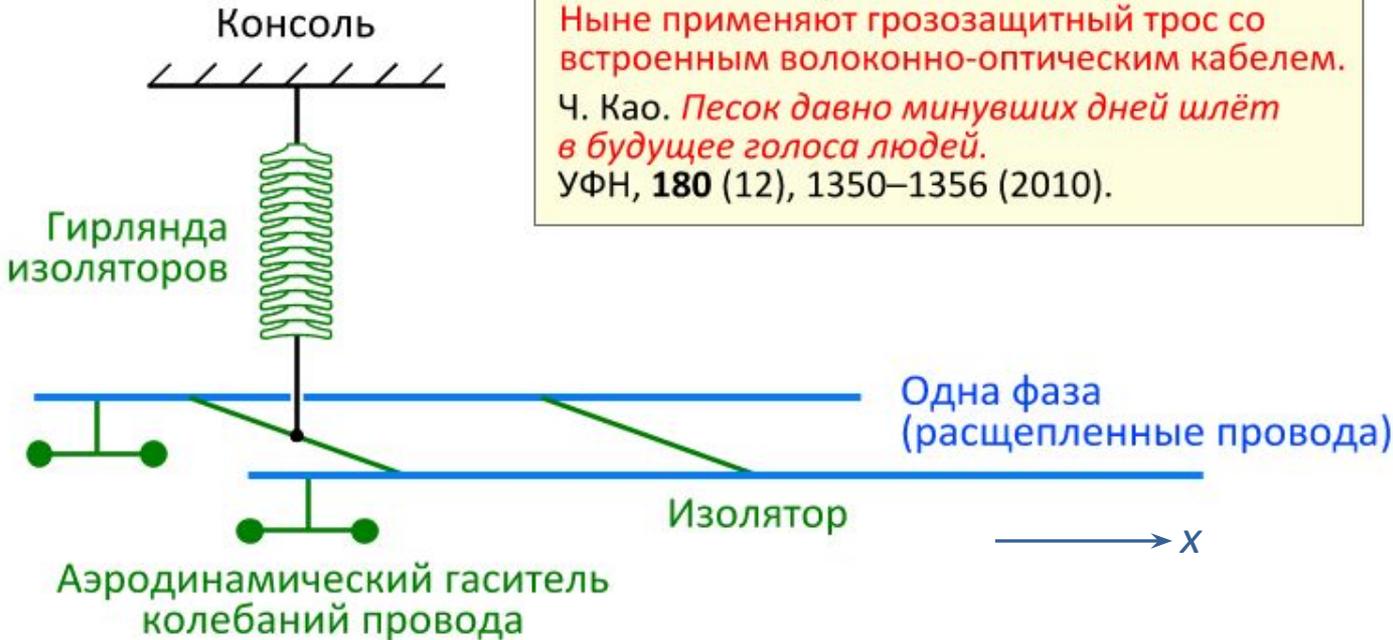


Электромеханика и оптика

высоковольтной трехфазной линии электропередачи

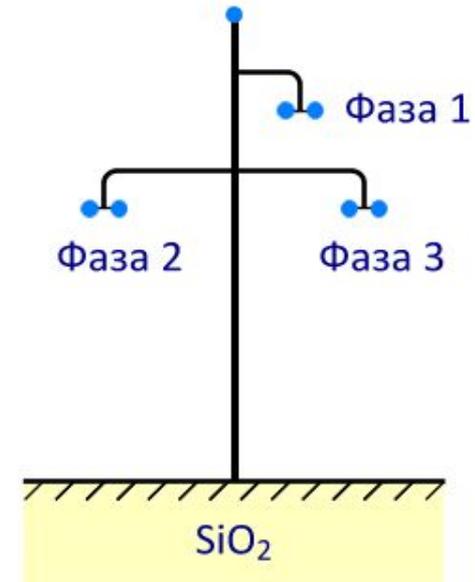
Расщепление проводов применяется для устранения протяженного коронного разряда на проводах (В.Ф. Миткевич, 1910). Появление «короны» не только вызывает потери передаваемой электроэнергии, но и создает искажения синусоидальной формы силы тока.

Линии 110 kV и выше на металлических и железобетонных опорах защищают заземленным тросом на всём протяжении. Ныне применяют грозозащитный трос со встроенным волоконно-оптическим кабелем. Ч. Као. *Песок давно минувших дней шлёт в будущее голоса людей.* УФН, 180 (12), 1350–1356 (2010).



$$U = 500 \text{ kV}; P \approx 900 \text{ MW}; \delta P / \delta x \approx 12 \text{ kW/km}$$

Грозозащитный трос +
оптическая линия связи
(ИК; $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$)



Илья Григорьевич Некрашевич

(1905–1993)

- Электрические неустойчивости в газоразрядной плазме и полупроводниках
- Селеновые выпрямители тока



И.Г. Некрашевич

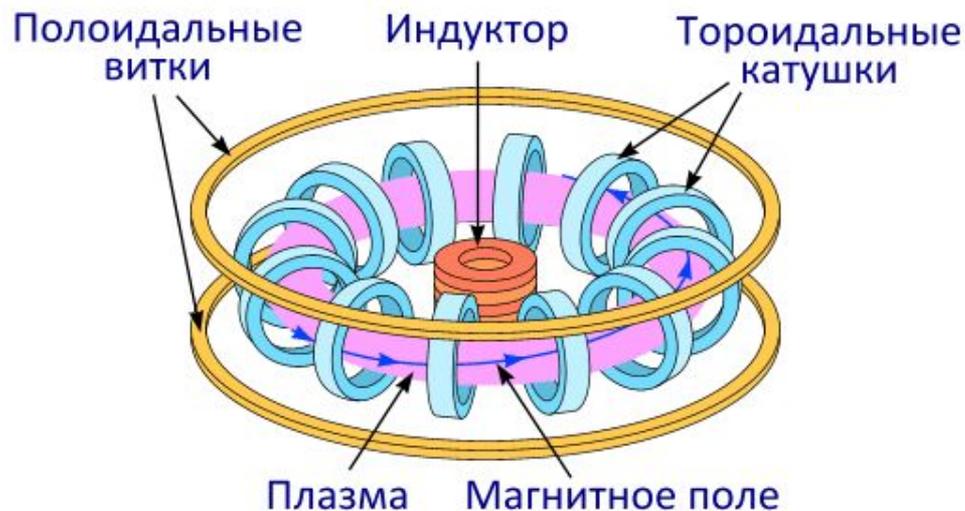


1. М.К. Мицкевич и др. *Электроэрозионная обработка металлов* / под ред. И.Г. Некрашевича (Минск: Наука и техника, 1988) 216 с.
2. Л.Я. Минько. *Получение и исследование импульсных плазменных потоков* (Минск: Наука и техника, 1970) 184 с.
3. И.И. Петровский. *Электронная теория полупроводников* (Минск: Высшая школа, 1964) 220 с.

Лев Андреевич Арцимович

(1909–1973)

- Электромагнитный метод
разделения изотопов
- Нейтронное излучение
высокотемпературной плазмы
- Управляемый термоядерный синтез



1. Л.А. Арцимович. *Элементарная физика плазмы* (М.: Атомиздат, 1969) 192 с.
2. В.С. Бураков, С.Н. Райков, В.Д. Шиманович. *Физика плазмы и плазменные технологии в Беларуси*. (Минск: ИМАФ, 2001) 52 с.

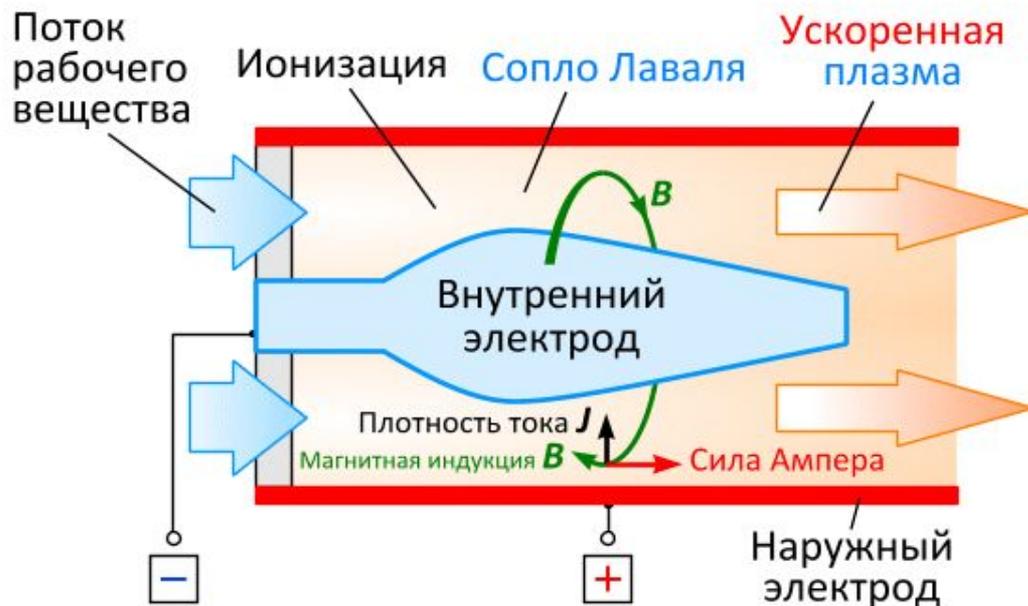
Леонид Иванович Киселевский

(1927–1991)

- Исследования по физике и технике плазмы
- Фотометрия Земли из космоса



Киселевский

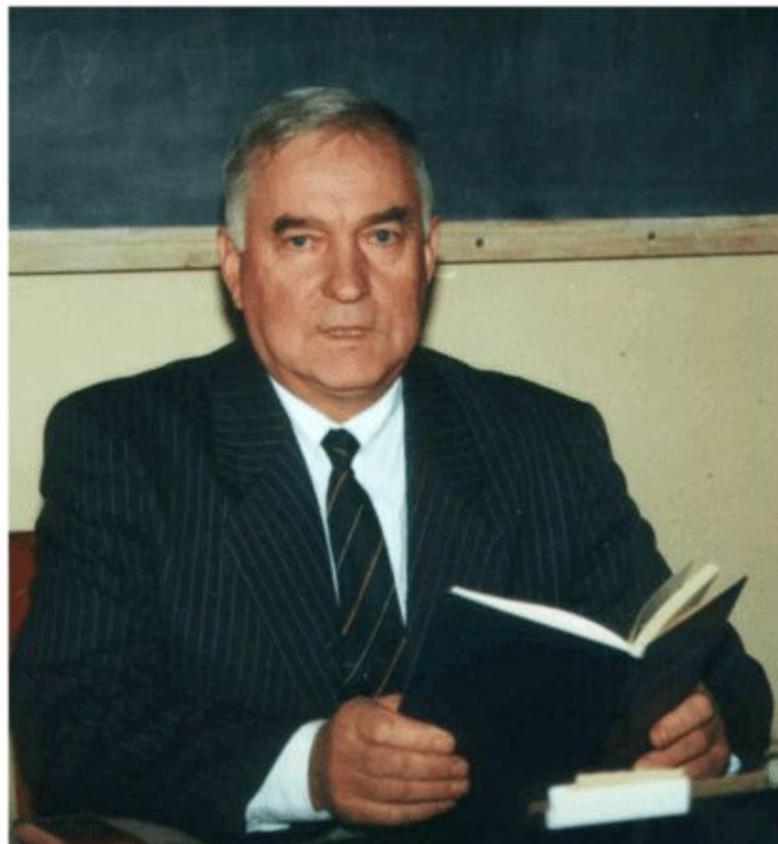


1. Л.И. Киселевский. *Вопросы спектроскопии низкотемпературной плазмы*. УФН, **108** (4), 767–768 (1972).
2. О.И. Ясько. *Электрическая дуга в плазматроне* (Минск: Наука и техника, 1977) 152 с.
3. В.М. Асташинский. *Двигатель плазменный*. Энциклопедия для школьников и студентов. В 12 т.
Т. 4. Мир техники / под общ. ред. Н.А. Поклонского (Минск: Беларус. Энцыкл. імя П. Броўкі, 2012) 665–666.

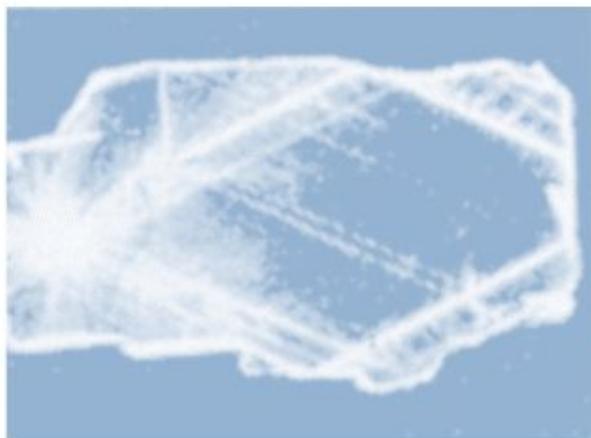
Виктор Павлович Грибковский

(1932–2000)

- Оптические и электрические процессы в полупроводниках
- Квантоворазмерные светоизлучающие структуры



В. Грибковский

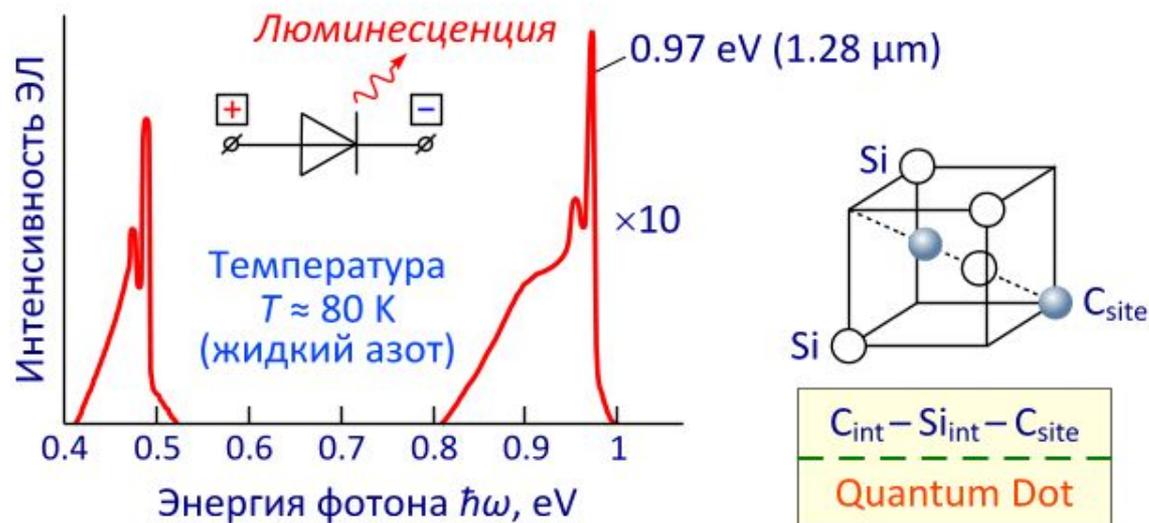


Стримерный разряд
в монокристалле ZnSe
при температуре $T = 300$ К

Валентин Дмитриевич Ткачев

(1939–1985)

- Радиационная физика полупроводниковых материалов
- Спектроскопия кристаллов и приборных структур



Спектр электролюминесценции кремниевого *pn*-диода, облученного γ -квантами (Co^{60}) флюенсом $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$

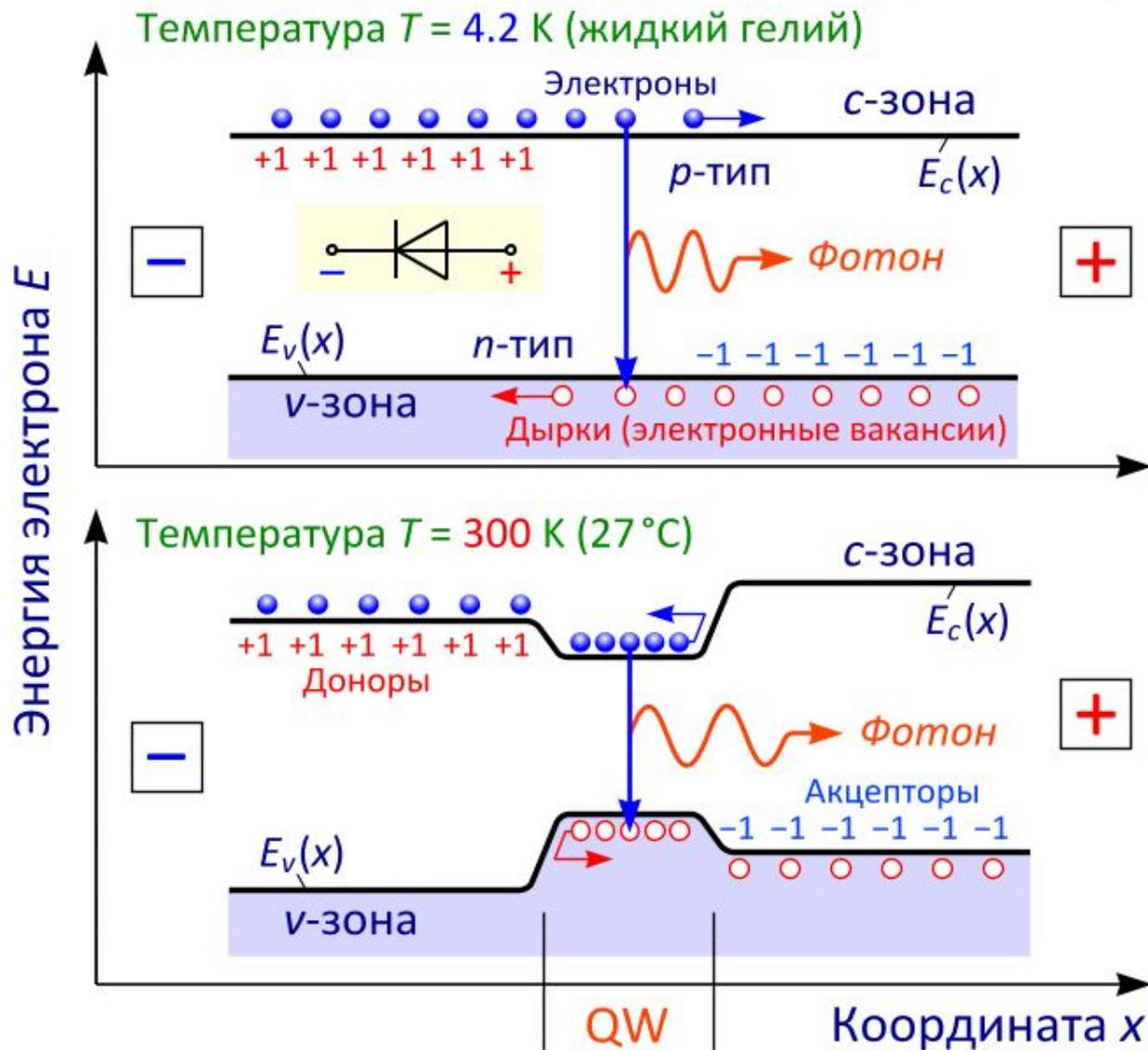


Жорес Иванович Алфёров (1930)



Полупроводниковые лазеры

18



1. Ж.И. Алфёров. *Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии*. УФН, **172** (9), 1068–1086 (2002).

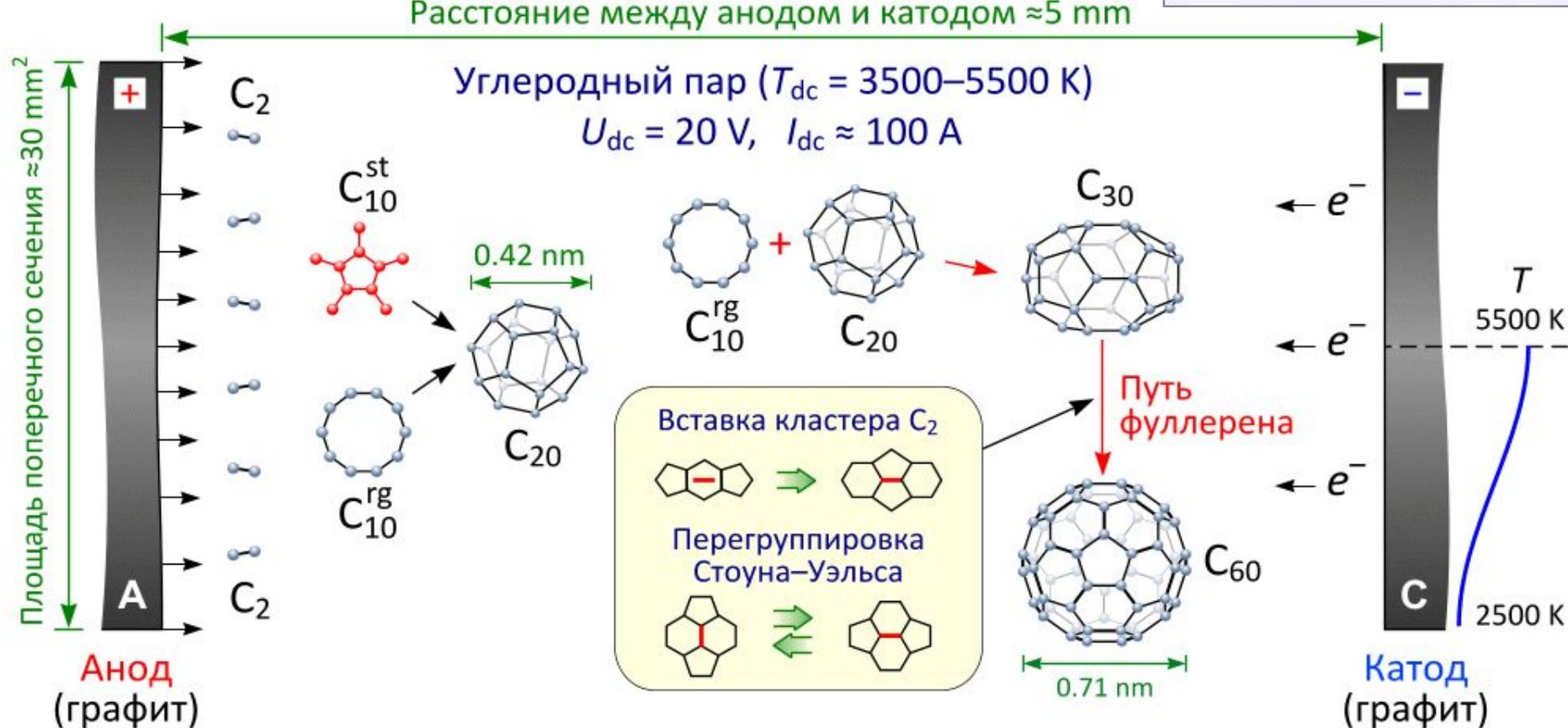
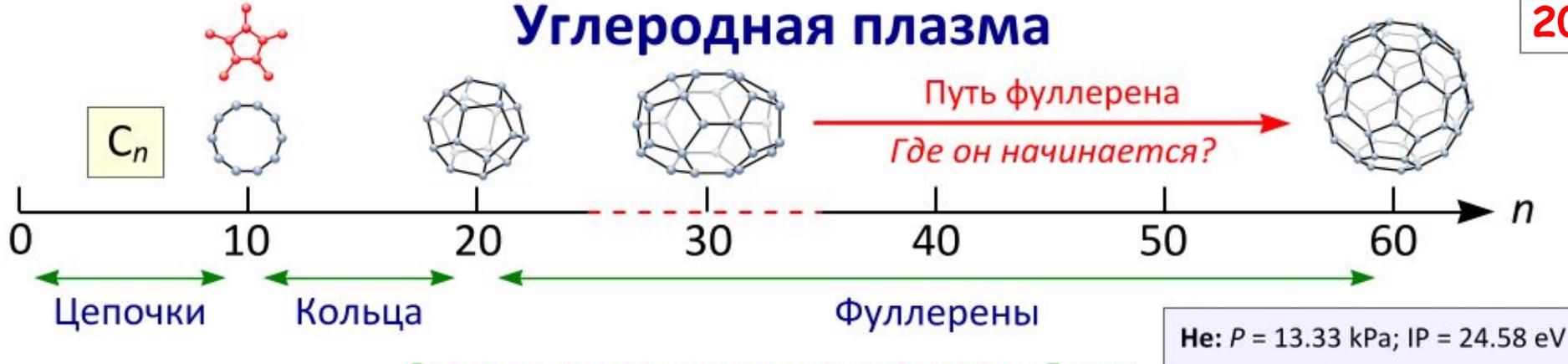
2. *Петербургская–Ленинградская школа электроники* / редкол.: Ж.И. Алфёров и др. (СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013) 658 с.

Одиночные и консолидированные 0D-, 1D-, 2D- и 3D-системы

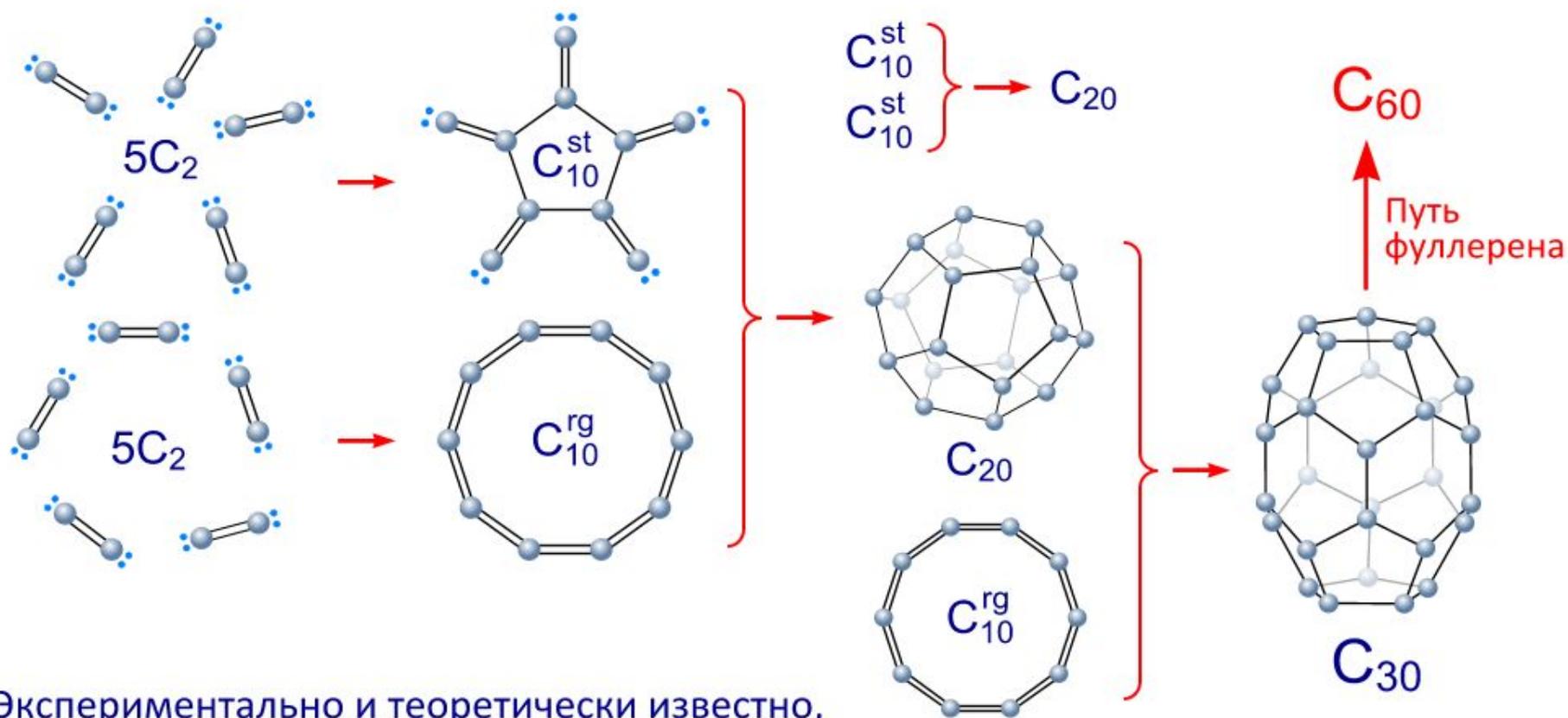
Низкоразмерная система — консолидированная система многих частиц, протяженность которой вдоль хотя бы одного направления в пространстве координат сравнима с одним из параметров размерности длины, характеризующих состояния и/или процессы в системе.

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

Углеродная плазма

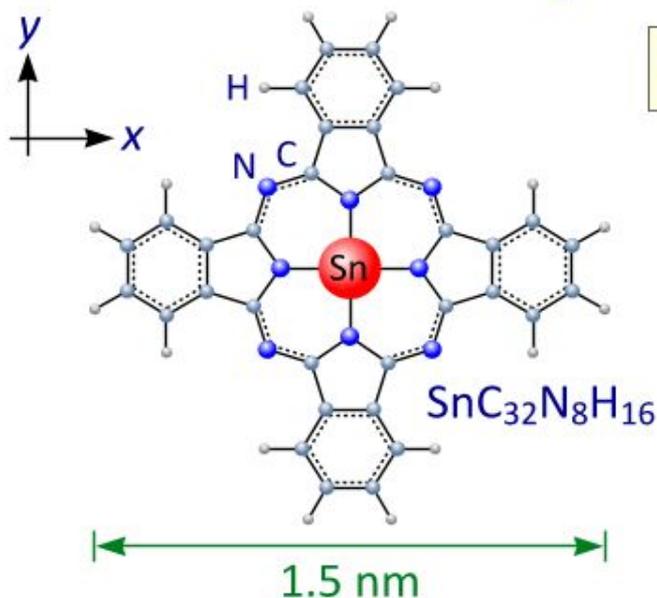


Н.А. Поклонский, Е.Ф. Кисляков, О.Н. Бубель, С.А. Вырко. Карбододекаэдр и возможный путь образования фуллеренов и углеродных нанотрубок в плазме дугового разряда. Вестн. Фонда фонд. иссл., № 3, 18 (2005).



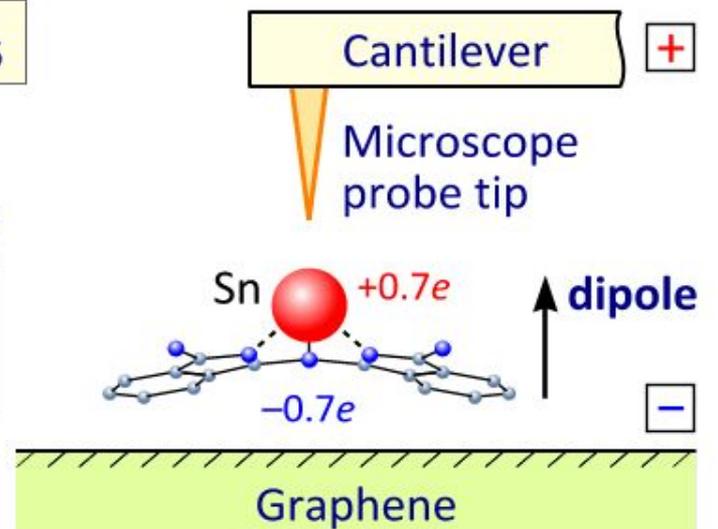
Экспериментально и теоретически известно, что кластеры C_n существуют в форме цепочек для $n < 10$ и колец для $n \geq 10$. Но как кластеры C_n становятся фуллеренами?

Электромеханика одиночной макромолекулы фталоцианина олова

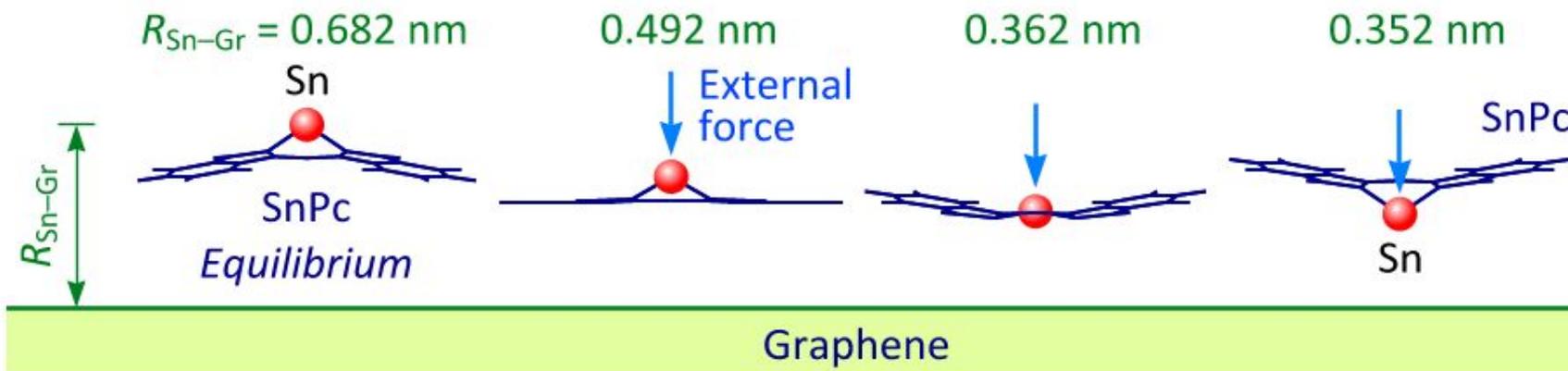


Inversion barrier:
 $\text{SnPc} \approx 2.5 \text{ eV}$
 $\text{NH}_3 \approx 0.2 \text{ eV}$

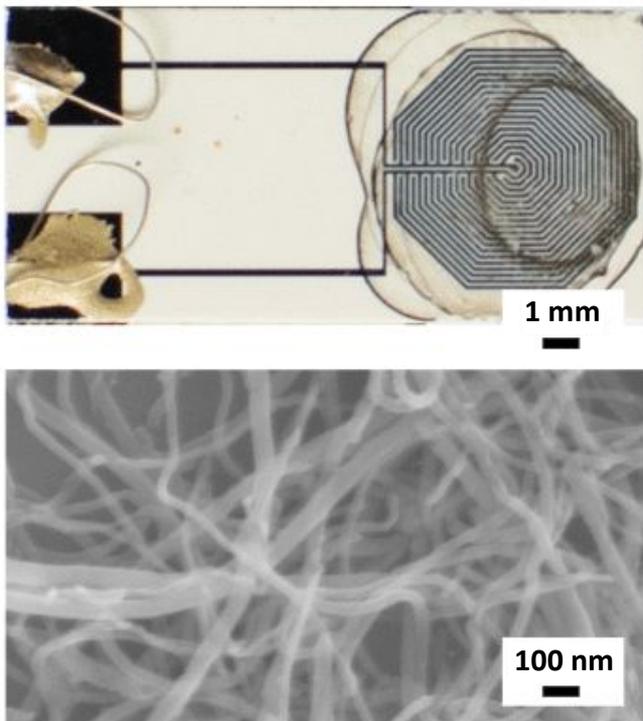
$R_{\text{Sn-Gr}}$



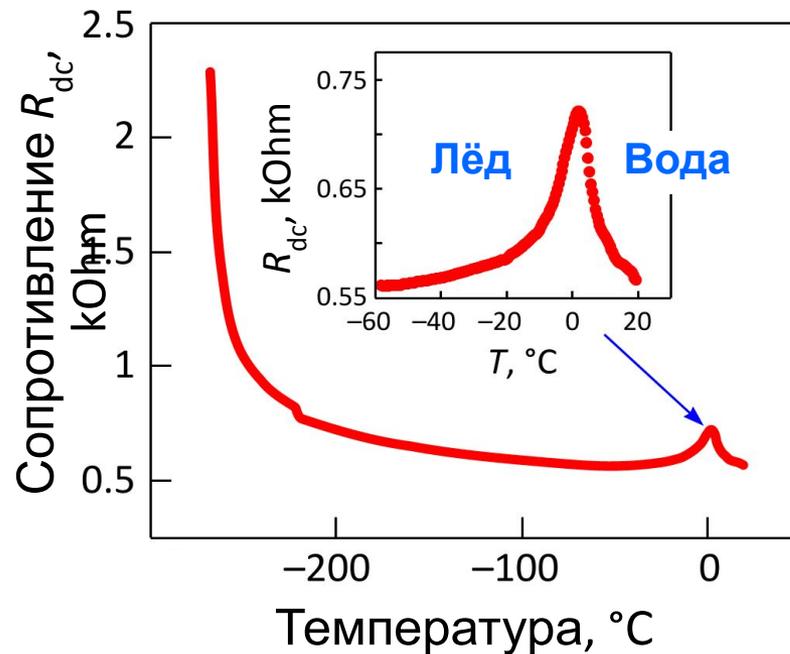
Частота колебаний $\approx 4 \text{ THz}$ ($\lambda \approx 80 \mu\text{m}$)



Сенсор обледенения на основе массива углеродных нанотрубок

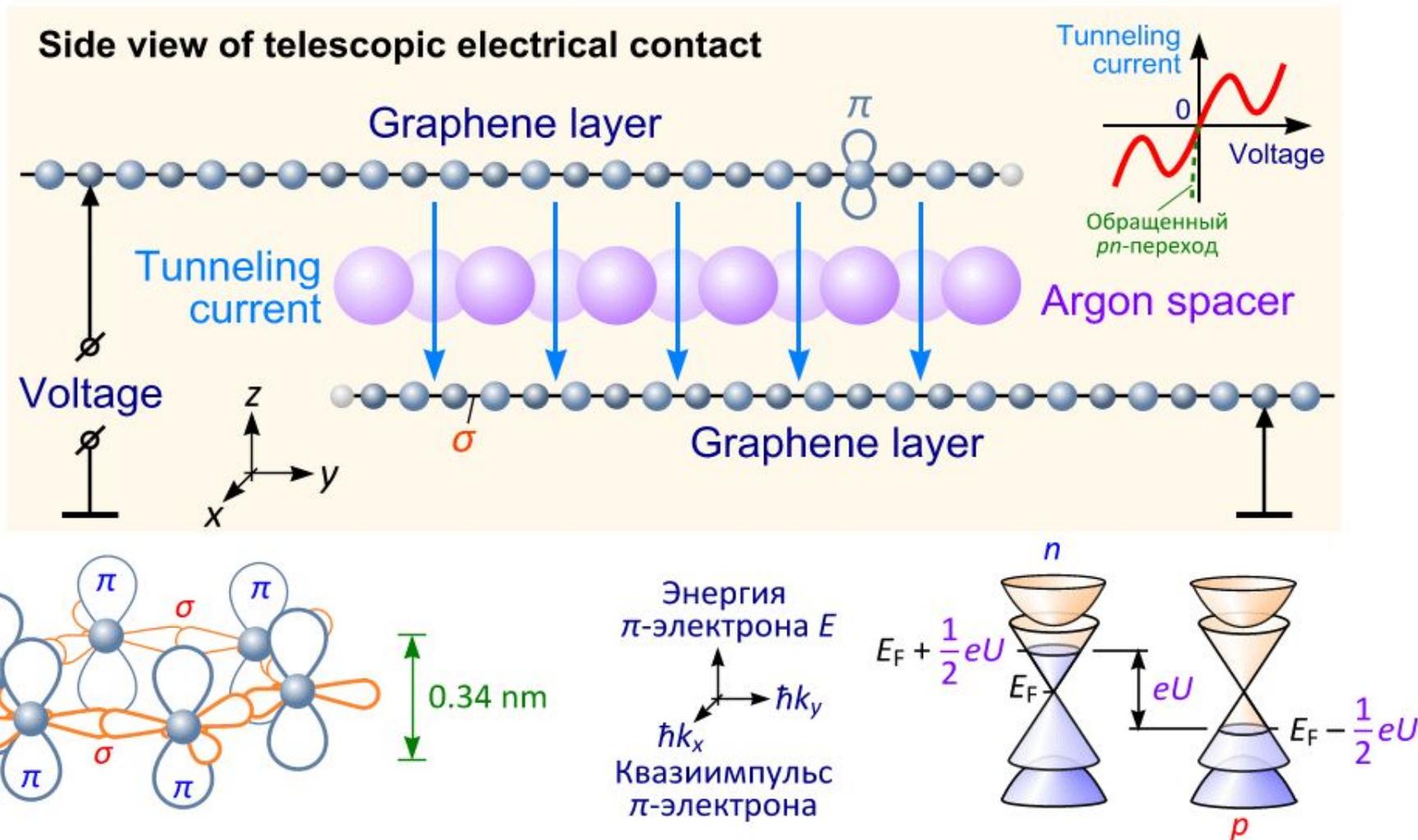


Морфология массива углеродных нанотрубок
(изображение получено на сканирующем электронном микроскопе)



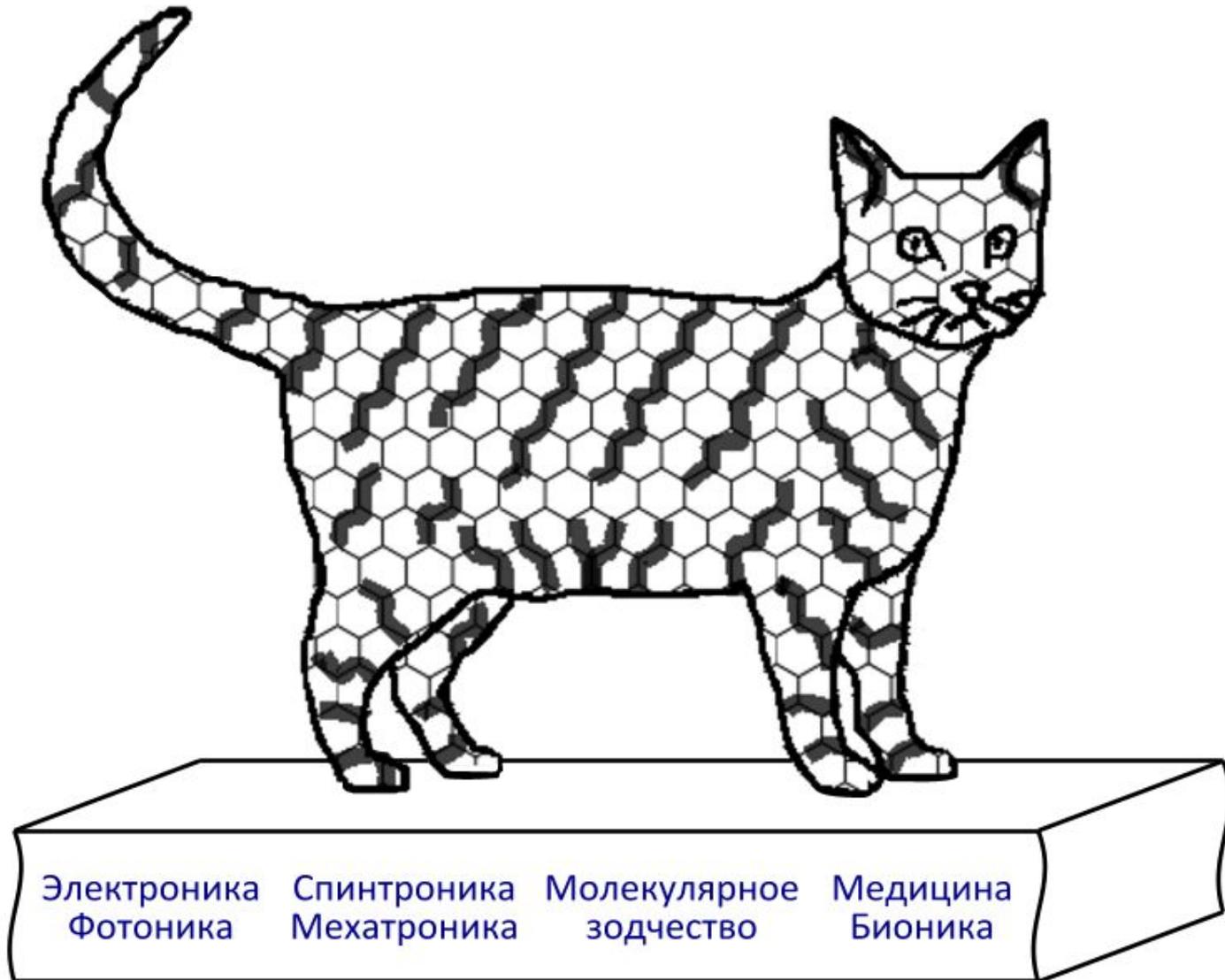
Зависимость электрического сопротивления сенсора от температуры
(измерения R_{dc} при охлаждении сенсора в парах жидкого гелия)

Туннельный диод: двухслойный графен с аргонной прослойкой моноатомной толщины



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. 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).

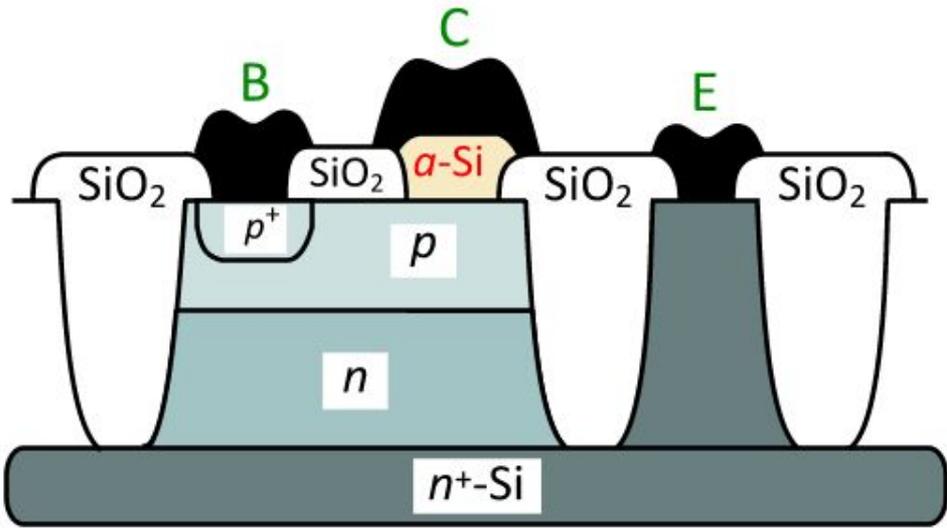
Графен: от существующего к возникающему



1. А.К. Гейм. *Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену*. УФН, **181** (12), 1284 (2011).

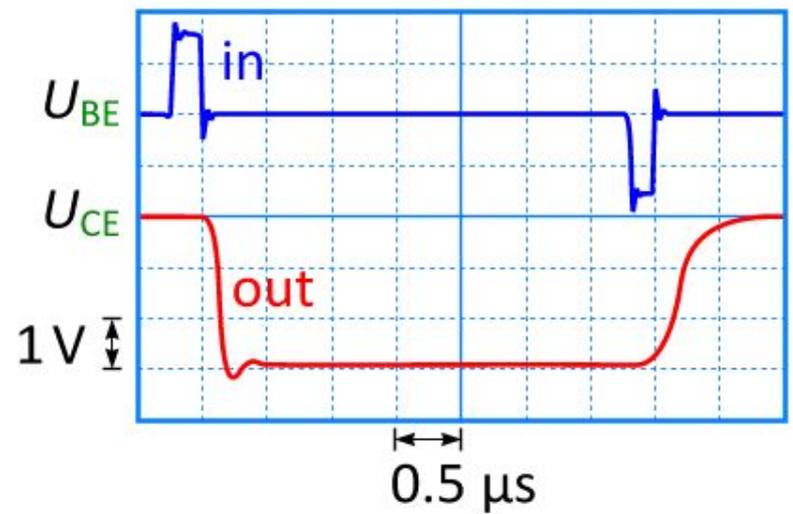
2. К.С. Шереметов. *Графен: материалы Флатлендиз*. УФН, **181** (12), 1299 (2011).

Ячейка памяти на биполярном транзисторе

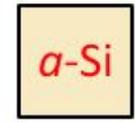


$T \approx 300\text{ K}$

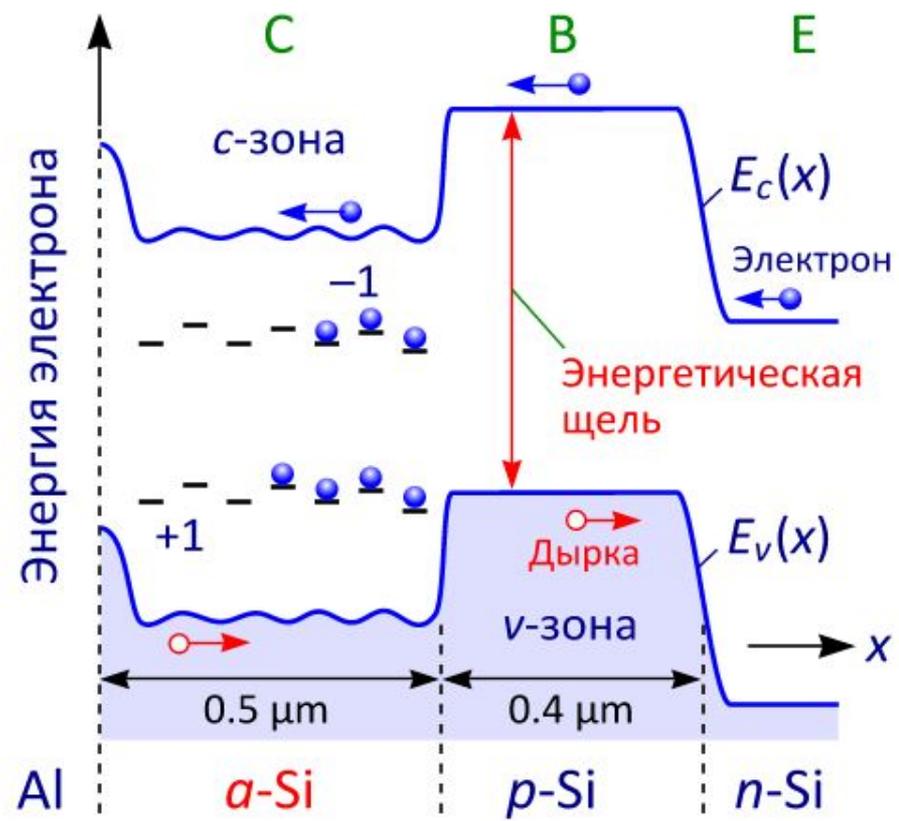
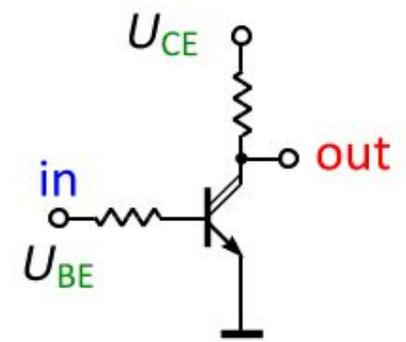
x



Площадь $10 \times 10\ \mu\text{m}^2$



Толщина $0.5\ \mu\text{m}$

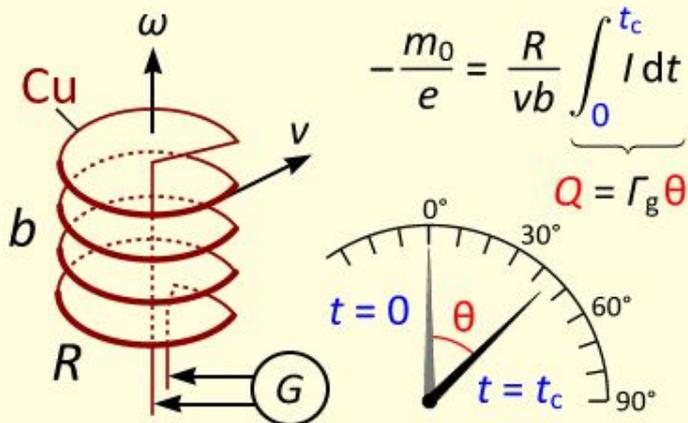


V.A. Dorosinets, V.A. Samuilov, N.A. Poklonski *et al.*
 Semicond. Sci. Technol., **14** (10), 897–900 (1999); *ibid.*, **15** (10), 980–984 (2000).

Кинетическая индуктивность электронов в цепи

Обобщение теоремы Рамо – Шокли

Опыт Толмена – Стюарта (1916)

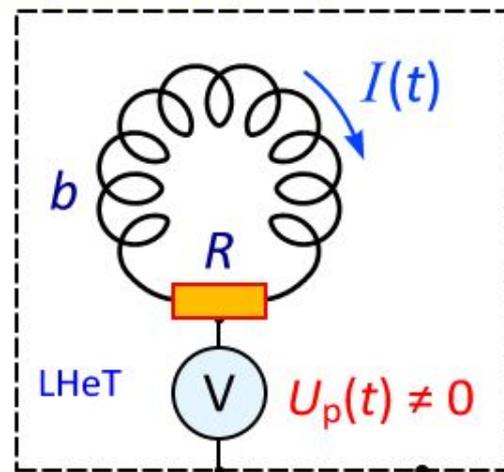
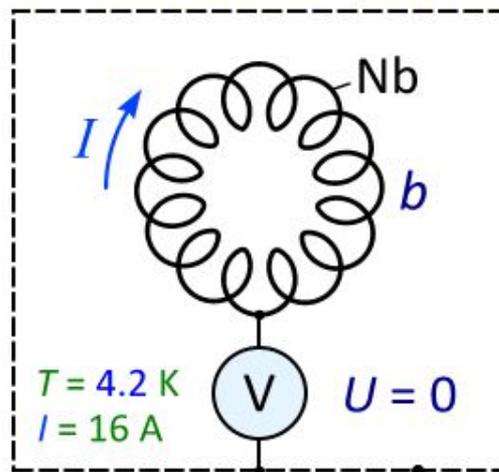


Температура $T = 300 \text{ K}$

$$-\frac{m_0}{e} = \frac{R}{vb} \int_0^{t_c} I dt$$

$$Q = \Gamma_g \theta$$

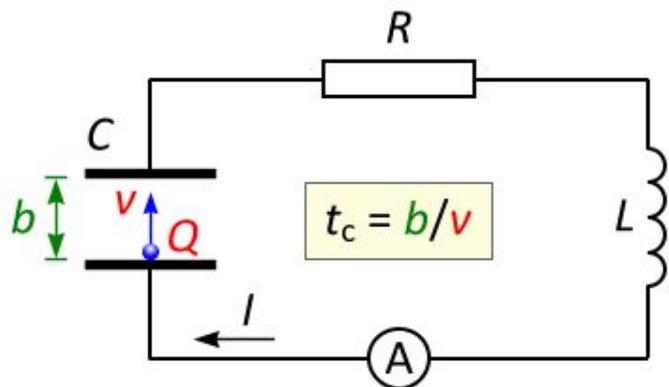
D.K. Lemon *et al.* Phys. Lett. A, **162**, 105–114 (1992).



$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} L_{\text{kin}} I^2$$

 \Rightarrow

$$U_p \propto \frac{b}{\rho_F} I^2$$



Теорема Рамо–Шокли (1938)

Импульс тока силой $I_{RS} = Q/t_c$
в течение времени $t_c = b/v$

1. Н.А. Поклонский, С.Ю. Лопатин. *Квадратичное по току электрическое поле контура сверхпроводящая катушка-резистор*. Письма в ЖТФ, **24** (2), 7–11 (1998).

2. Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.А. Кочерженко. *Соотношения Рамо–Шокли для последовательной RCL-цепи*. ЖТФ, **74** (11), 75–78 (2004).

Эпилог

1. Атомная электростанция

2. Солнечная энергетика

3. Ветряки



Панямонн е



Шчыры дзякуй за



Наднёман, XIX в.
Рисунок Наполеона Орды











**Портрет Я.О. Наркевича-Иодко
работы А. Белявского (2017)**