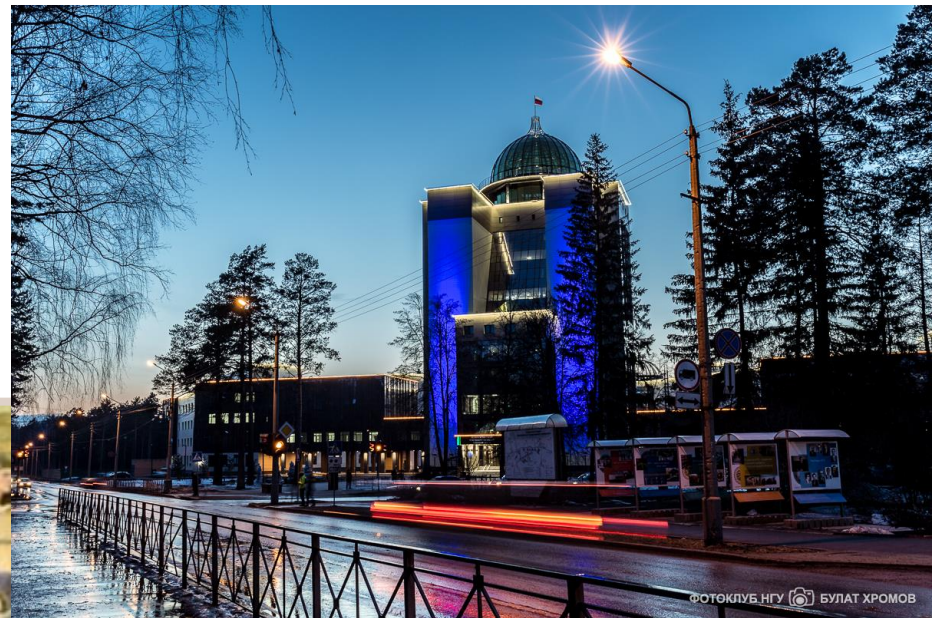
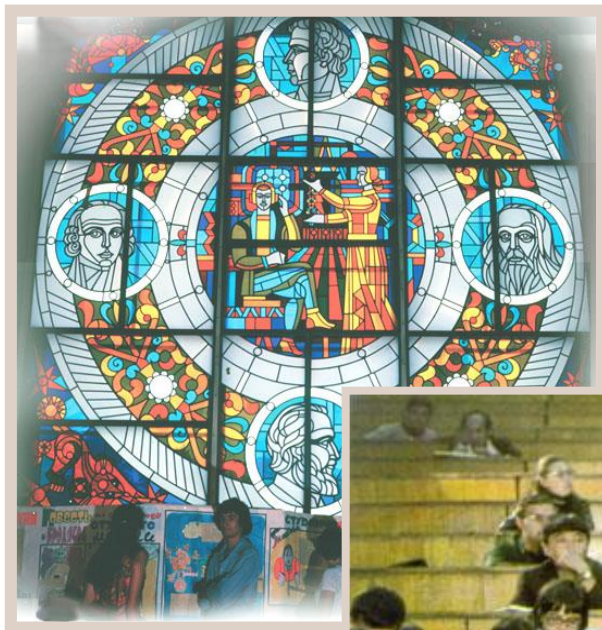




Введение в технику физического эксперимента

Лектор – проф. Пальчиков Евгений Иванович

ВТФЭ-2016

Методы получения и измерения высоких напряжений

Сильноточная электроника

Пальчиков Евгений Иванович
д.т.н., проф. НГУ, в.н.с. ИГиЛ

*Новосибирский Государственный университет
Сибирское Отделение Российской академии Наук*

Лекция № 10÷11 – 09.11.2016, НГУ, БФА

© Пальчиков Е.И., 2016

© Новосибирский государственный университет, 2016

Методы получения высоких напряжений

Статические напряжения

- Контактная разность потенциалов и механическое разделение зарядов
- Генератор Ван-Де-Граафа
- Мультипликаторы зарядов (электрофорные машины)

Переменные и импульсные напряжения

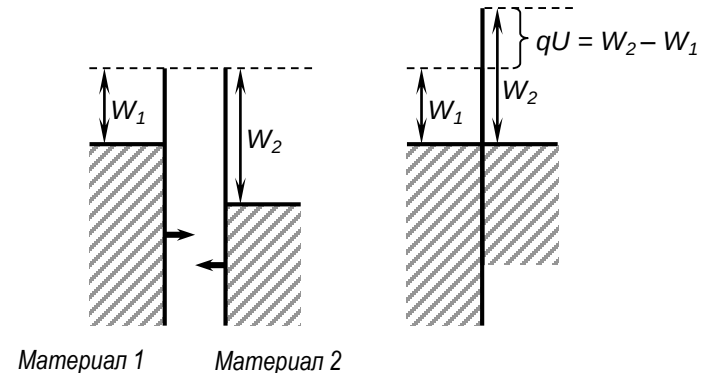
- Повышающий трансформатор
- Катушка Румкорфа
- Трансформатор Тесла

Преобразователи

- Каскадный умножитель Кокрофта
- ТДКС, динамитроны

Возникновение высоких статических напряжений

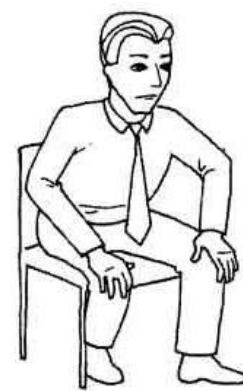
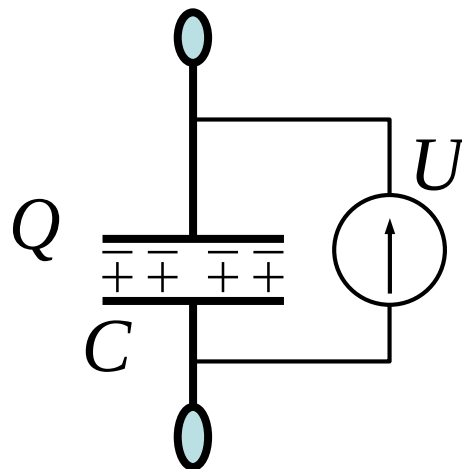
1. Откуда берется высокое напряжение при трении?
2. Емкость – растаскивание зарядов.
3. Эксперимент с подпрыгиванием и электроскопом.
4. Человек, встающий со стула.



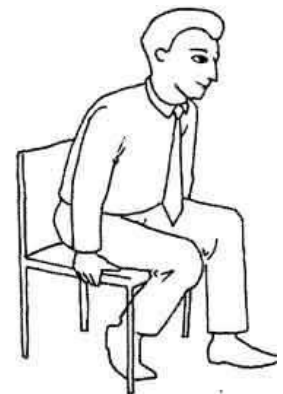
$$Q = C \cdot U = \text{const}$$

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \sim \frac{S}{d}$$

$$U \sim \frac{Q}{S} \cdot d$$



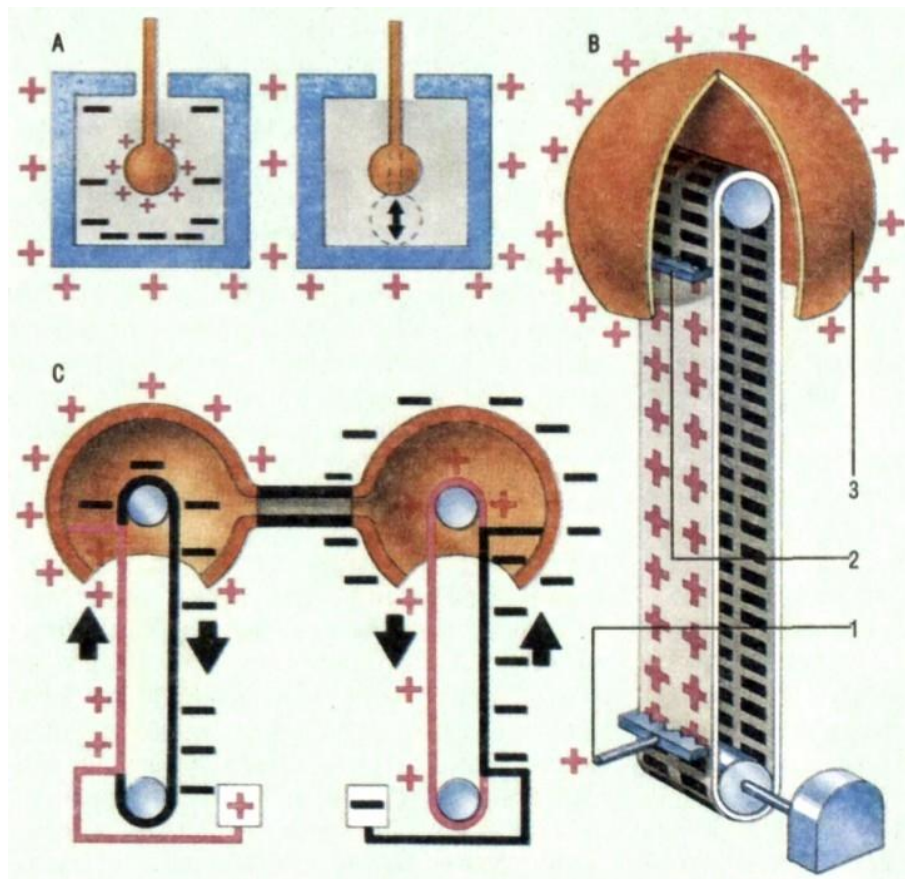
$d < 1 \text{ мкм}$



d – растёт до метров

Электростатические генераторы

$$Q \sim N$$



Ван де Граафа



Вимшурста

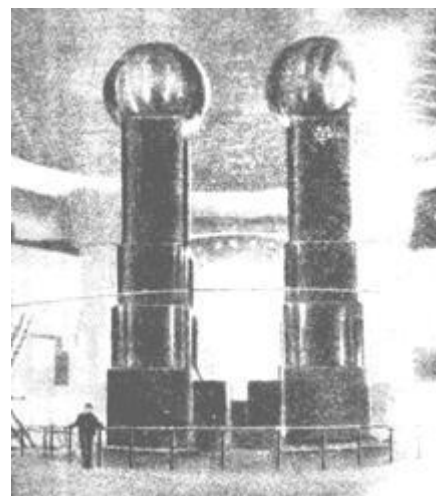
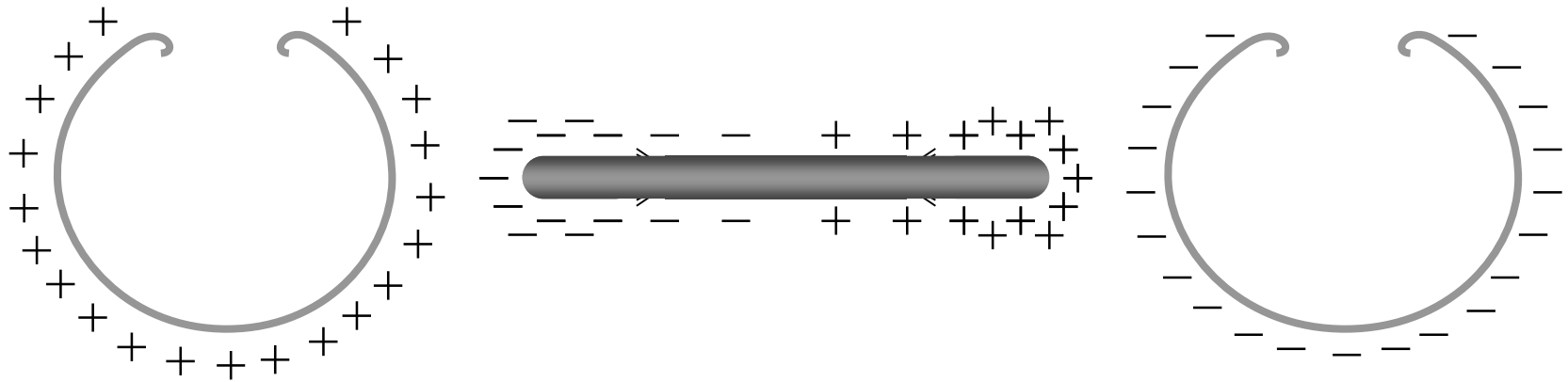
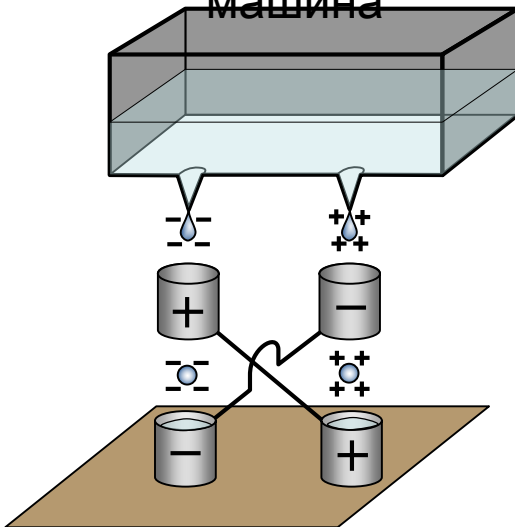


Схема генератора с электростатической индукцией

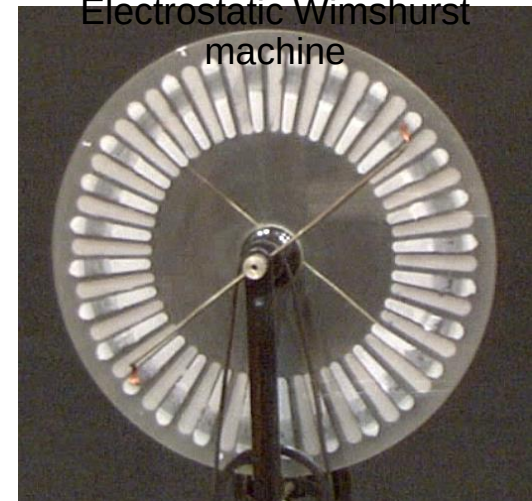


Капельная
электрофорная
машина

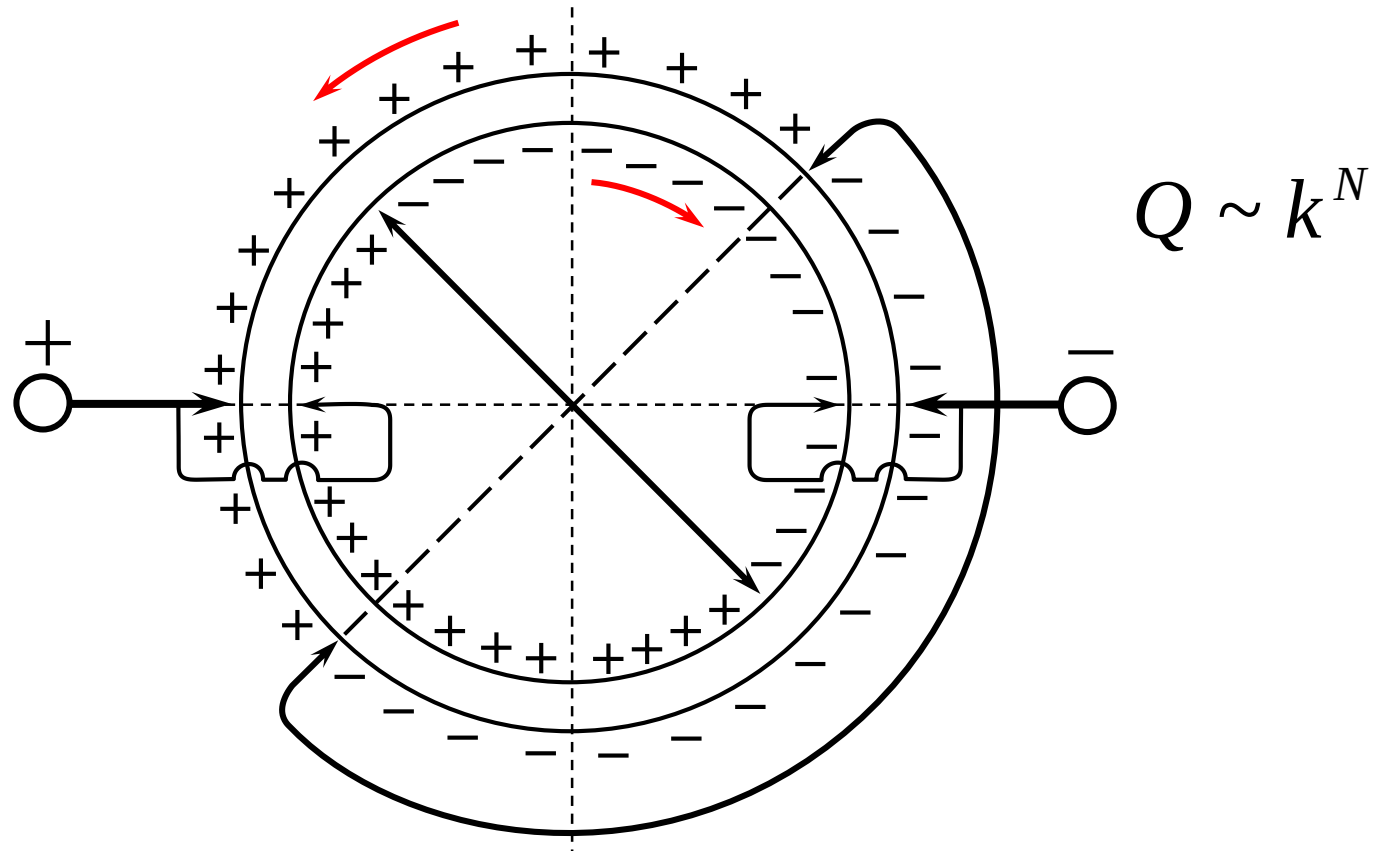


Электрофорная
машина

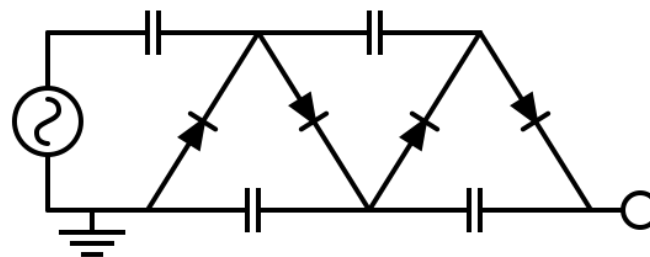
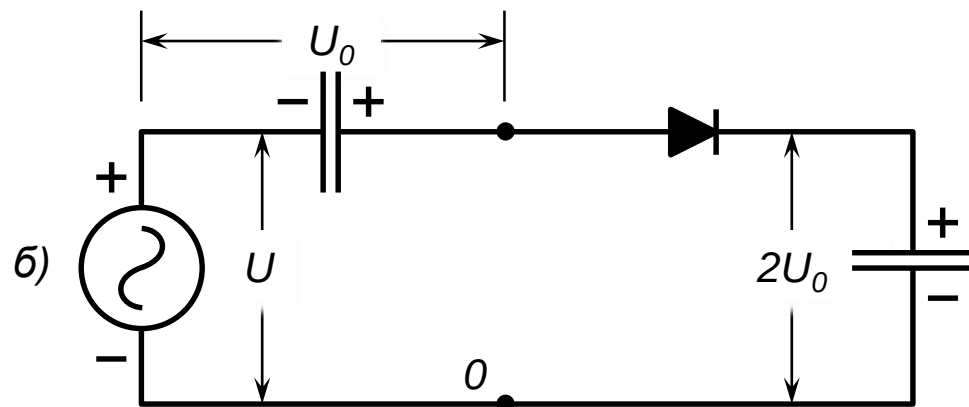
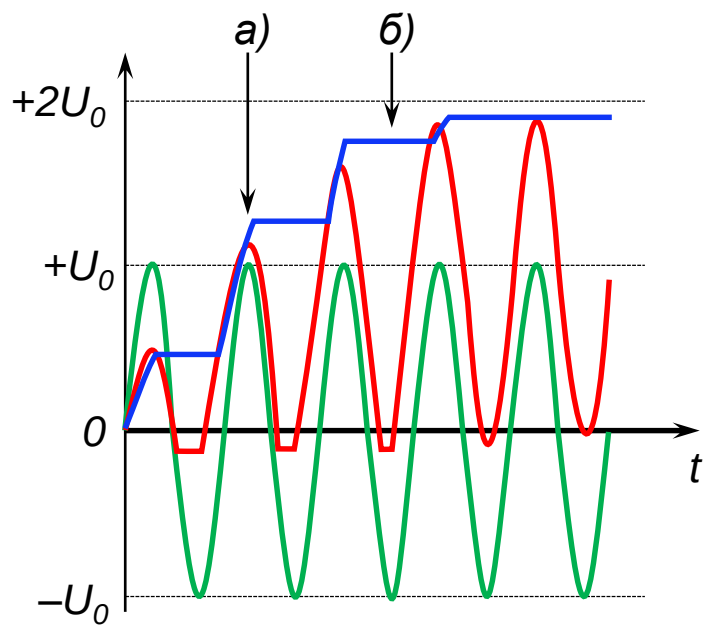
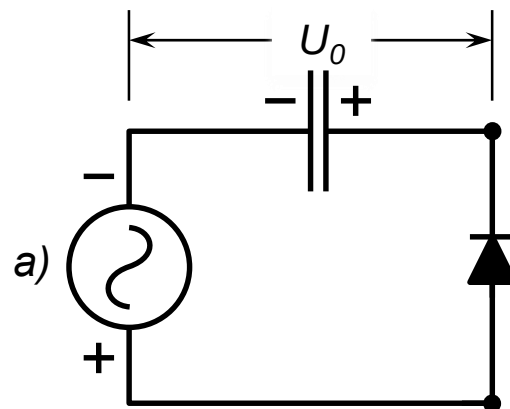
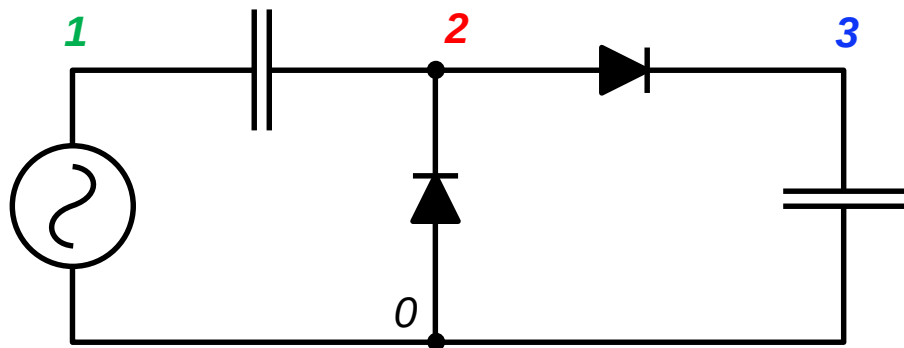
Electrostatic Wimshurst
machine



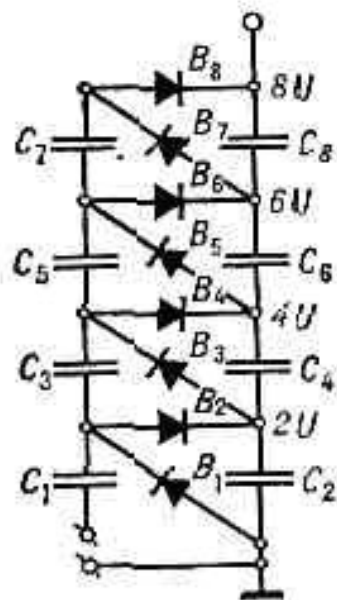
Принцип действия электрофорной машины



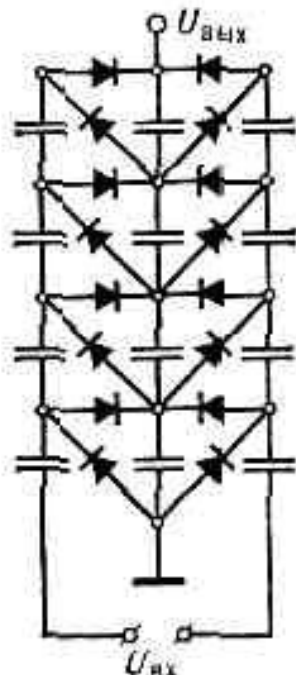
- Машина является мультипликатором зарядов
- Принцип действия – электростатическая индукция
- Заряд растет в геометрической прогрессии от угла поворота дисков
- Напряжение ограничено пробивной прочностью диэлектриков по поверхности и коронным разрядом в воздух



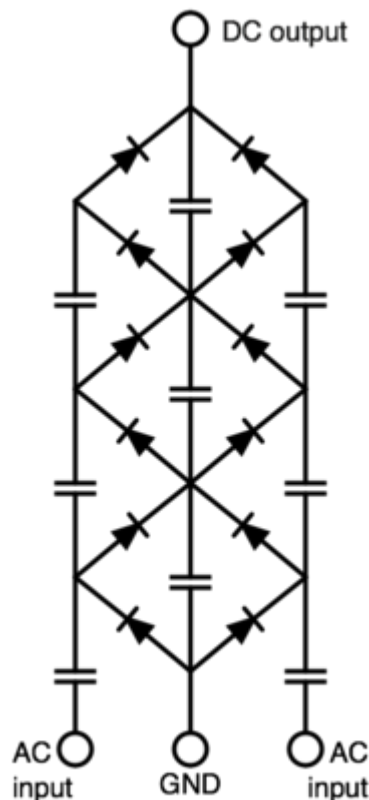
Каскадный умножитель



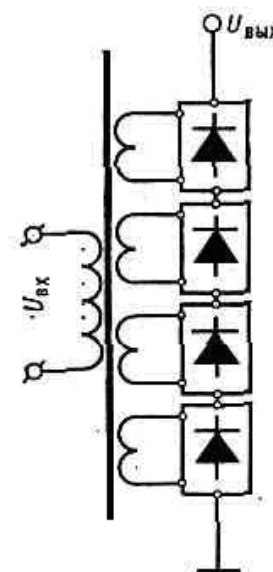
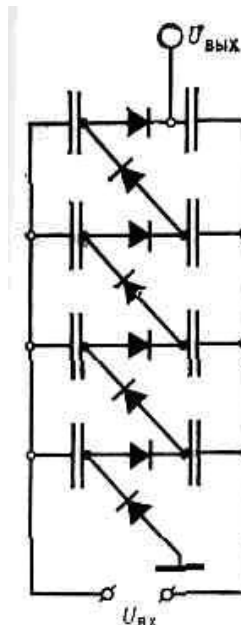
Однофазный



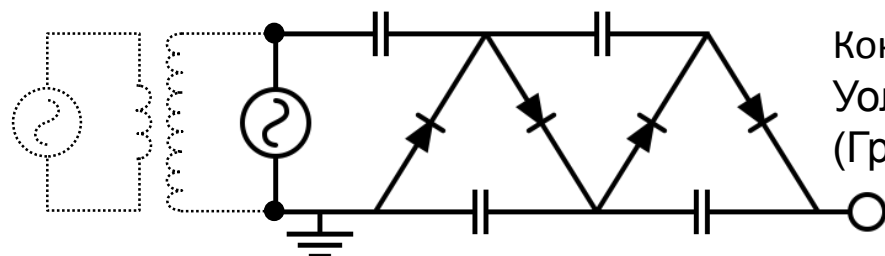
Двухфазный



Динамитрон



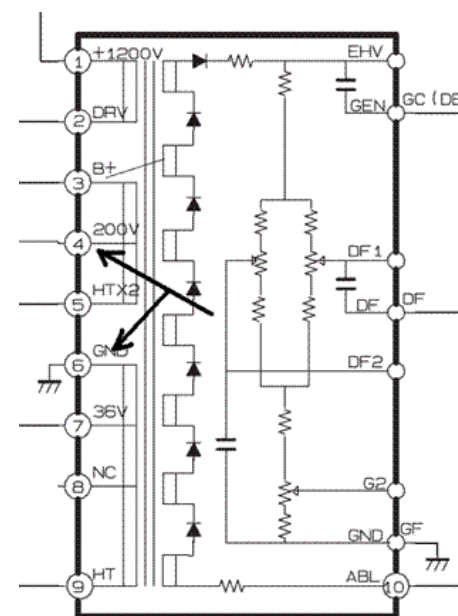
07



Кокрофта-Уолтона (Грейнахера)

ТДКС

трансформатор диодно-каскадный строчный



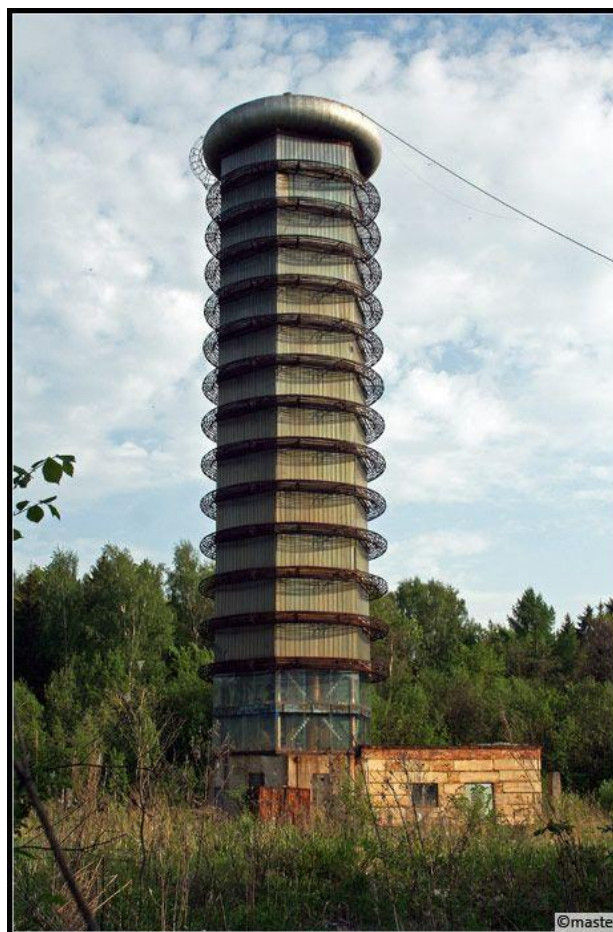
ВВ генераторы – филиал ВНИЦ ВЭИ, г. Истра

<http://www.vei-istra.ru/>

<http://deletant.livejournal.com/83953.html>



Умножитель Кокрофта-Уолтона



6-9 МВ Генератор
Аркадьева-Маркса



3 МВ ~
трансформатор

Методы получения импульсных высоких напряжений и токов

- Катушка Румкорфа
- Трансформатор Тесла в ударном режиме
- Индуктивный накопитель с взрывным размыкателем
- Генератор Аркадьева-Маркса Каскадный генератор Фитча – Хауэлла
- Спиральный генератор Белкина – Фитча
- Трансформатор Льюиса
- Ступенчатые линии
- Взрывные магнитно-кумулятивные системы

История трансформатора

- **В 1831 г** англичанином **М. Фарадеем** и американцем **Д. Генри** было открыто явление электромагнитной индукции. Собственно после этого стало возможным открытие трансформатора. Можно считать, что устройство Фарадея с железным кольцом, на котором были намотаны две изолированные друг от друга обмотки представляло собой прообраз современного трансформатора.
- **В 1835–1844 гг. различными авторами было запатентовано несколько десятков индукционных катушек.** В них при размыкании первичной обмотки во вторичной наводилась значительная по величине ЭДС, вызывавшая между концами этой обмотки большие искры.
- **1848 г.** – парижский изготовитель приборов немецкого происхождения **Генрих Даниэль Румкорф** усовершенствовал индукционную катушку. За что в 1864 г. император Франции постановил наградить его премией имени Вольты. Следующие сто лет катушка Румкорфа часто использовалась всеми экспериментаторами, когда было нужно получить высокое напряжение, и практически не претерпела при этом никаких изменений.
- **1896 г.** - американский физик сербского происхождения **Никола Тесла** запатентовал новый тип трансформатора – именно в том виде, какой сейчас называется термином «Трансформатор Тесла».

Электромагнитная индукция была обнаружена независимо друг от друга в Англии Майклом Фарадеем и в Америке Джозефом Генри в 1831 году, однако Фарадей первым опубликовал результаты своих экспериментов



Англия

Майкл
Фарадей

1831

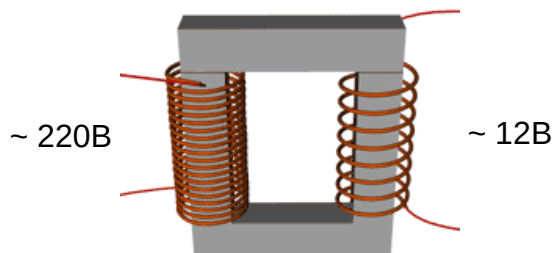


Америка

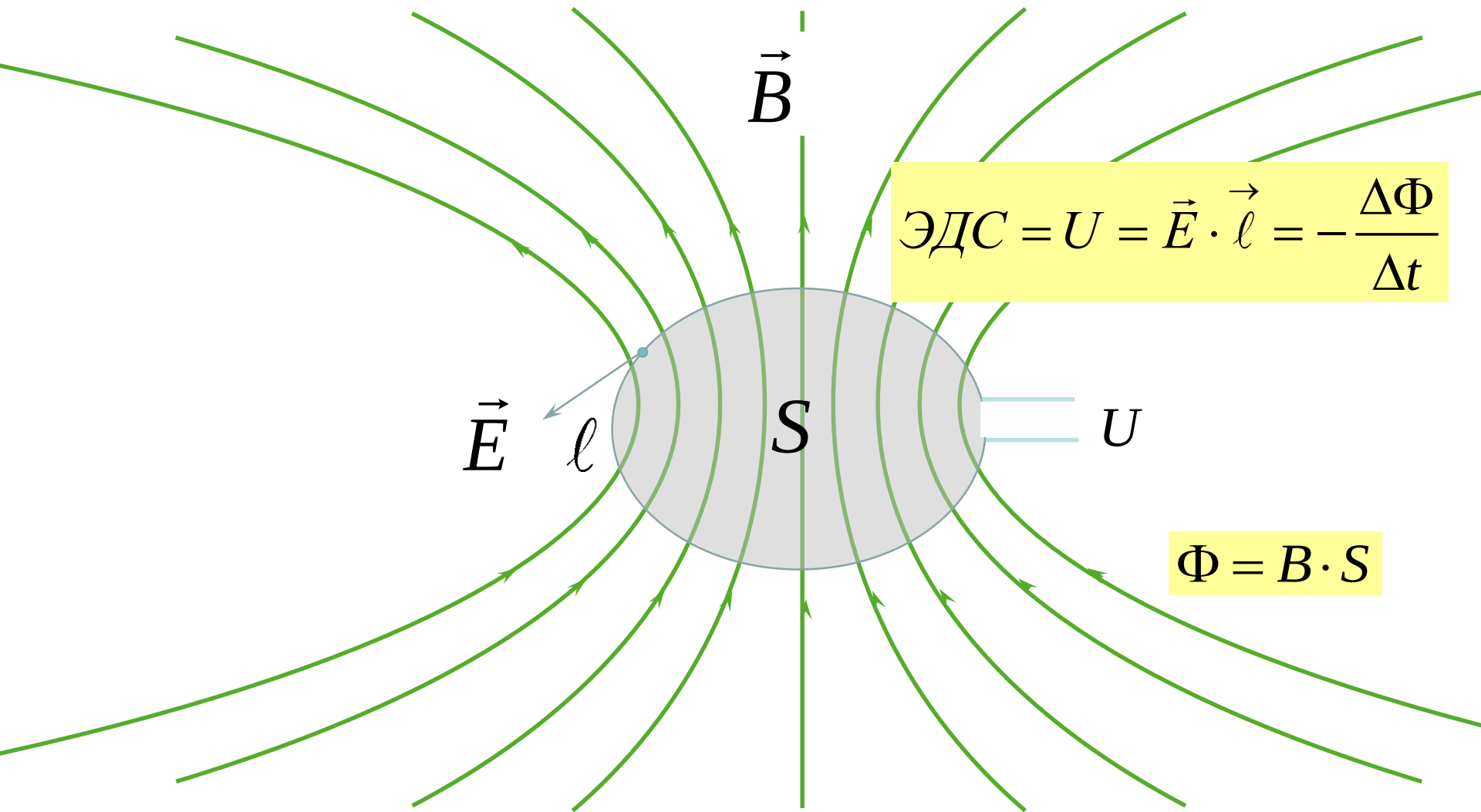
Джозеф
Генри

Эти работы связали явления электричества и магнетизма, послужили основой создания новой области знаний в физике.

В технике они послужили основой для создания трансформаторов – приборов для преобразования и передачи электрической энергии.



Электромагнитная индукция – это явление возникновения ЭДС индукции в контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур



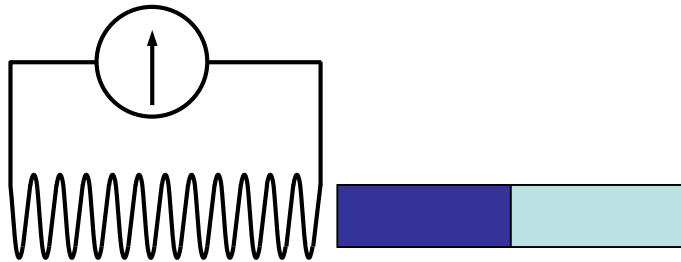
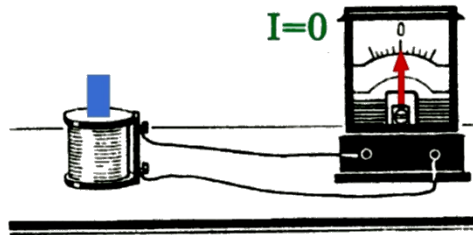
Закон э-м. индукции. Величина ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока.

Опыты Фарадея и Генри

С катушкой и магнитом
(плавное изменение)



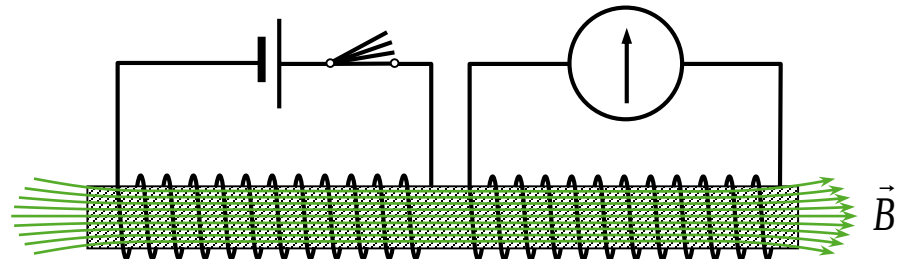
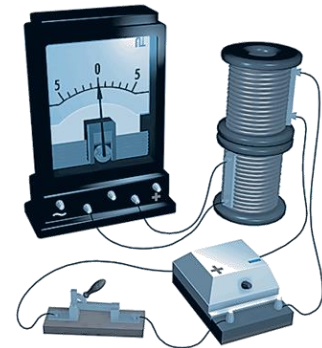
М. Фарадей



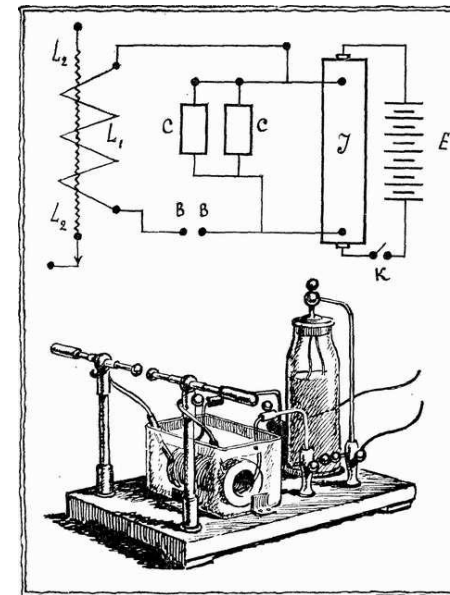
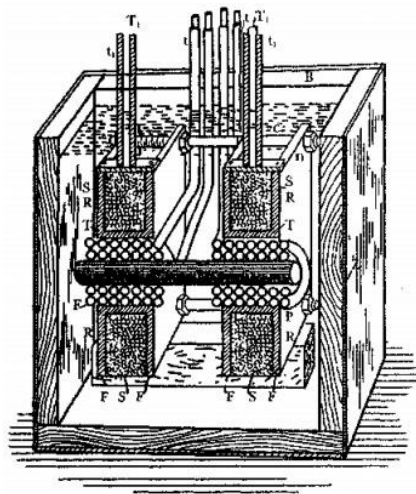
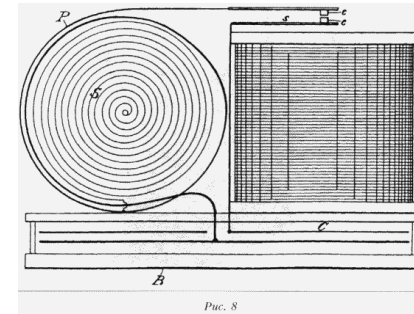
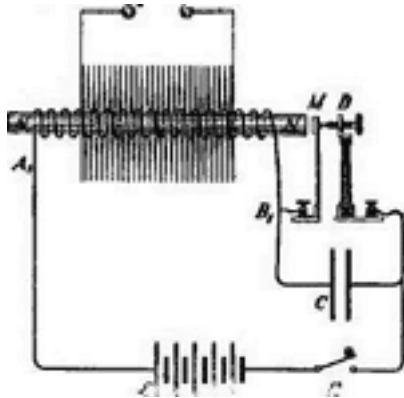
С катушками и рубильником
(скачкообразное)



Дж. Генри



Предшественники и конкуренты катушки Румкорфа



Румкорф Генрих Даниэль (15.1.1803-20.12.1877) - изобретатель.

Родился в Ганновере.

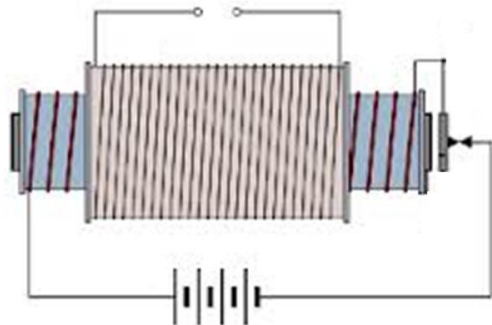
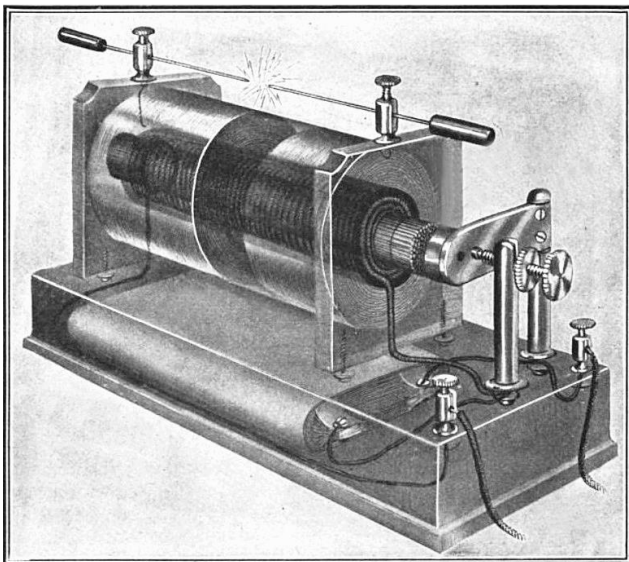
С 1840 г. – конструктор точных инструментов в Париже.

Изобрел в 1848 г. индукционную катушку, генерирующую токи высокой частоты.

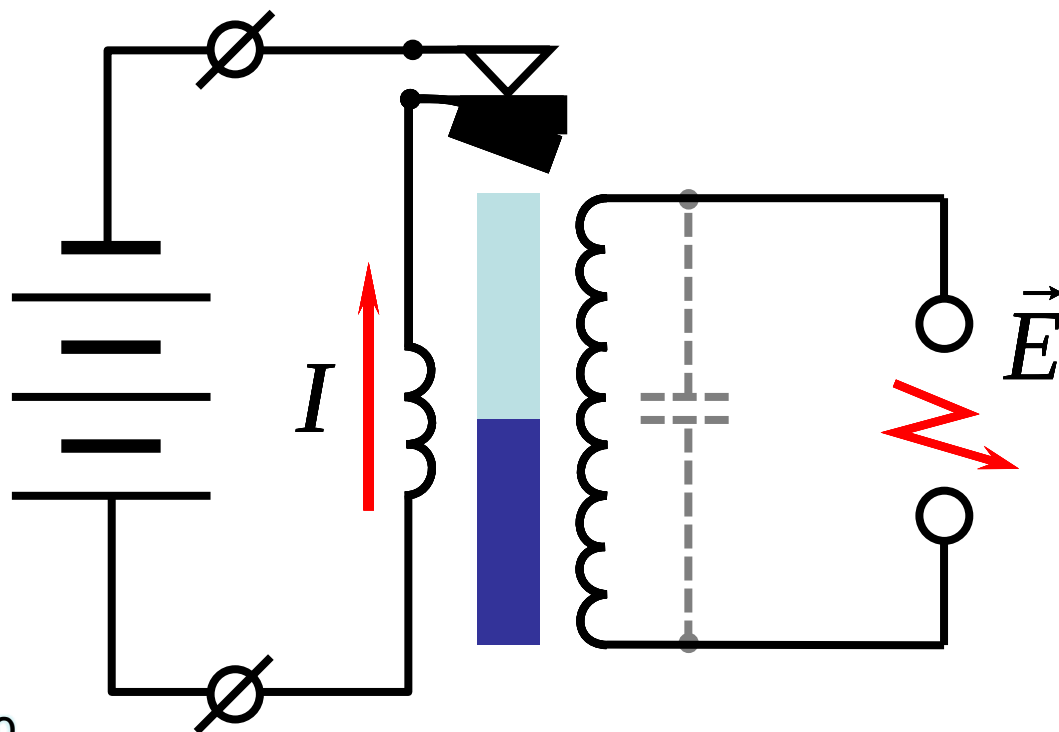


Именно он предложил наиболее удачную версию этого устройства, которое сохранилось почти в полной неизменности до наших дней и носит название «катушка Румкорфа».





Энергия запасается в намагниченном железном сердечнике — **в магнитном поле**. При размыкании контактов энергия магнитного поля переходит в электрическую.



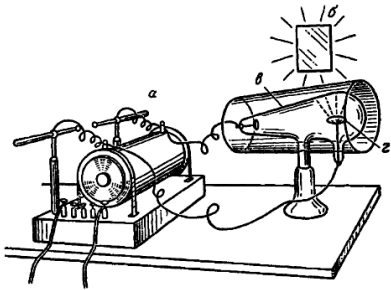
Влияние катушки Румкорфа на развитие физики в 20 веке

С помощью Катушки Румкорфа были сделаны крупные открытия и изобретения, повлиявшие на ход развития физики и техники в 20-м веке:

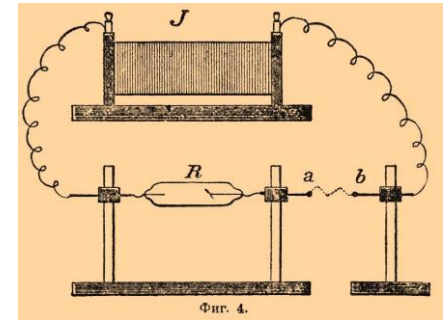
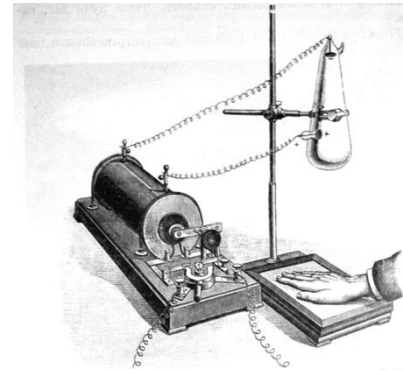
открытие элементарных частиц (электронов, ионов) и работа с ними, открытие рентгеновских лучей, прецизионная спектроскопия с газоразрядными трубками (приведшая к появлению квантовой механики).

Катодные лучи, Ионы.

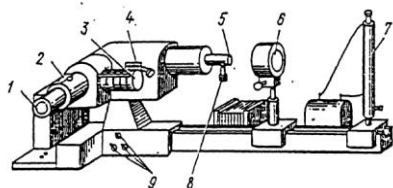
Открытие и работа с заряженными и элементарными частицами



Рентгеновские установки



Спектроскопия. Квантовая механика

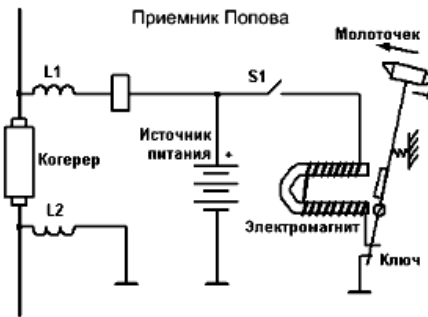
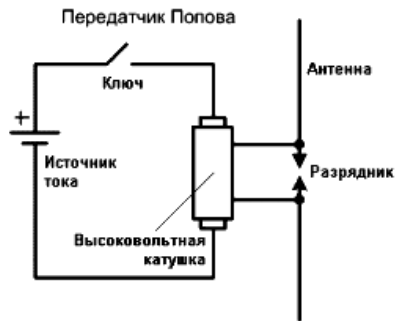


Газоразрядная трубка. Спектры. Квантовые переходы

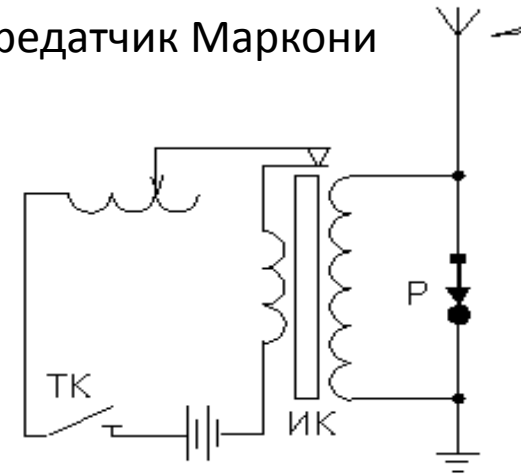
Влияние катушки Румкорфа на развитие физики в 20 веке

Радиосвязь

Передатчик Попова ... и приемник

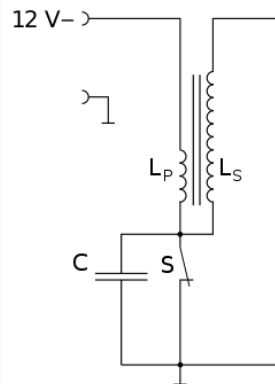


Передатчик Маркони



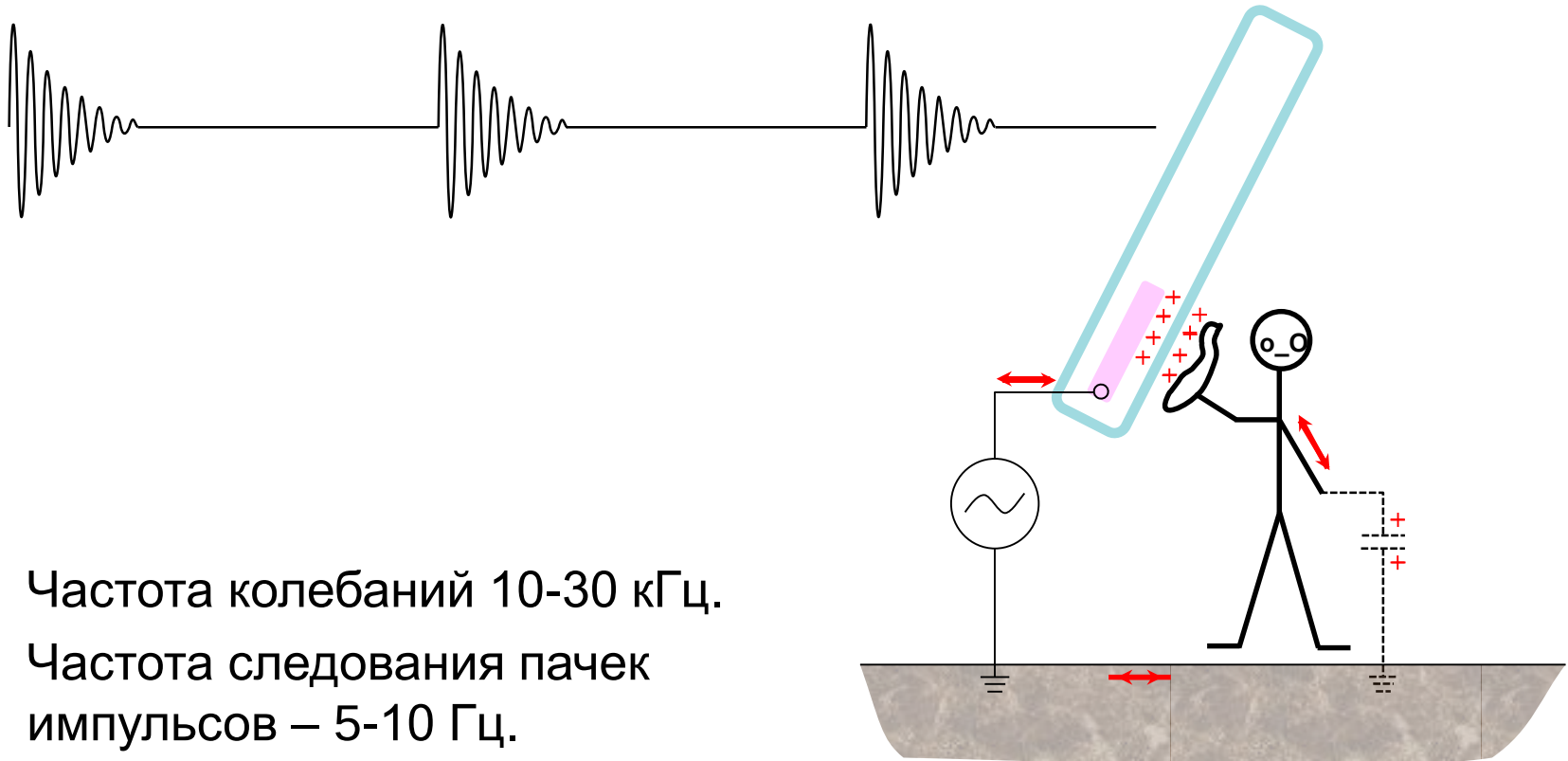
... генерирование радиоволн, системы зажигания двигателей внутреннего сгорания.

Автомобильные системы зажигания



Эксперименты с импульсными ВВ разрядами 10 -30 кГц 100 кВ

- Разряды: в воздухе, в трубках.
- Токи смещения – разряд через емкость.

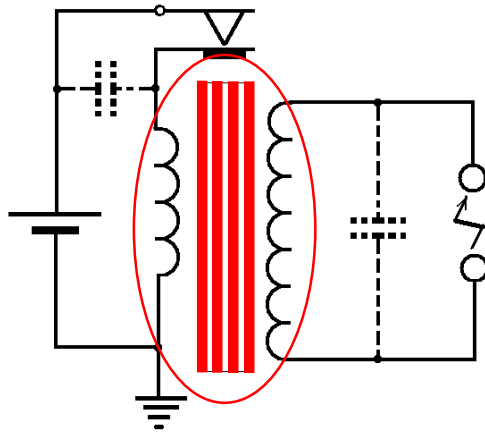


- Частота колебаний 10-30 кГц.
- Частота следования пачек импульсов – 5-10 Гц.

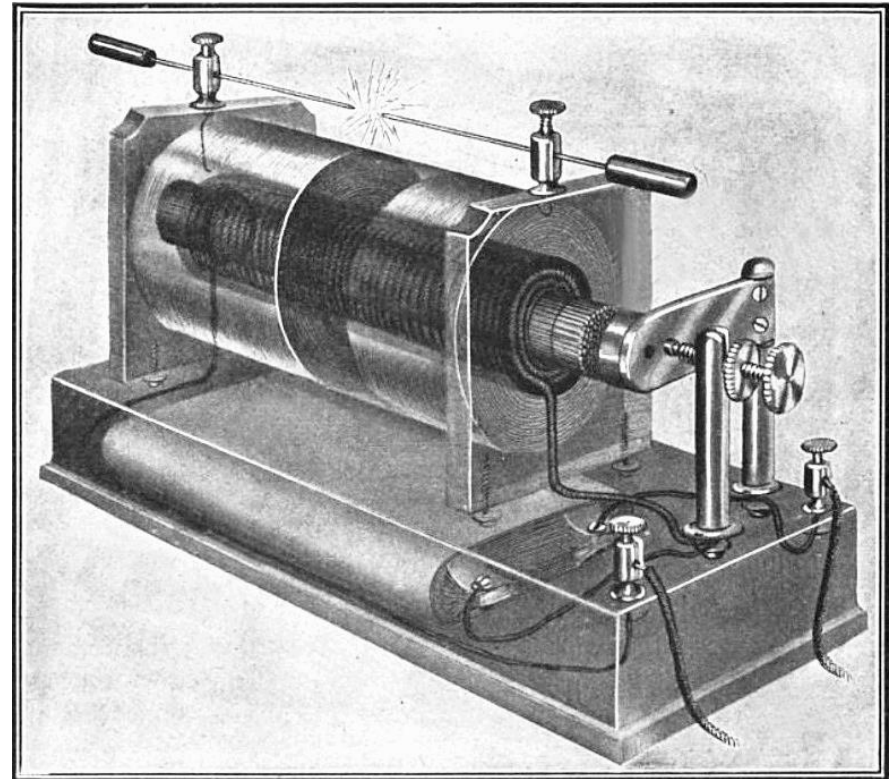
Предыстория

В 1831 г. Англичанин **М. Фарадей** и американец **Д. Генри** – первый трансформатор

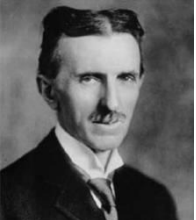
1848 г. **Генрих Даниэль Румкорф** – катушка Румкорфа



**Энергия запасается в
намагниченном железном
сердечнике – в магнитном
поле**

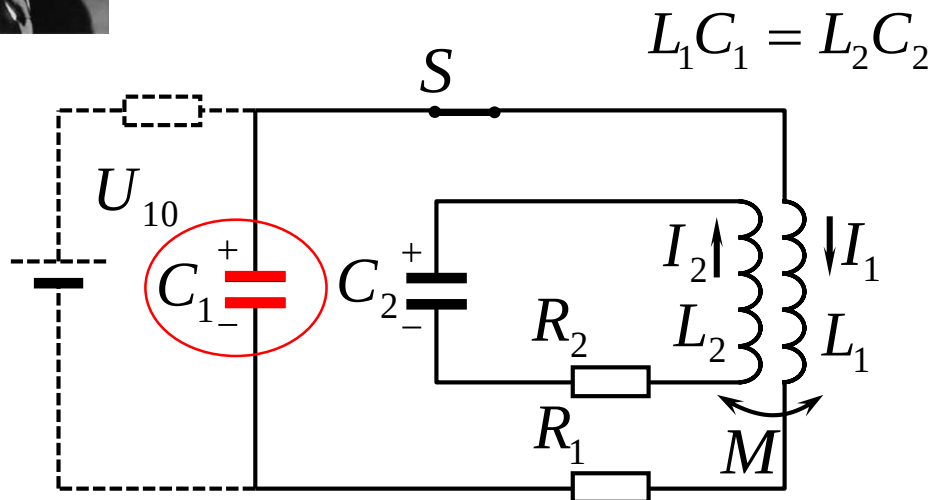


Первичный и вторичный колебательные контуры
не настроены в резонанс



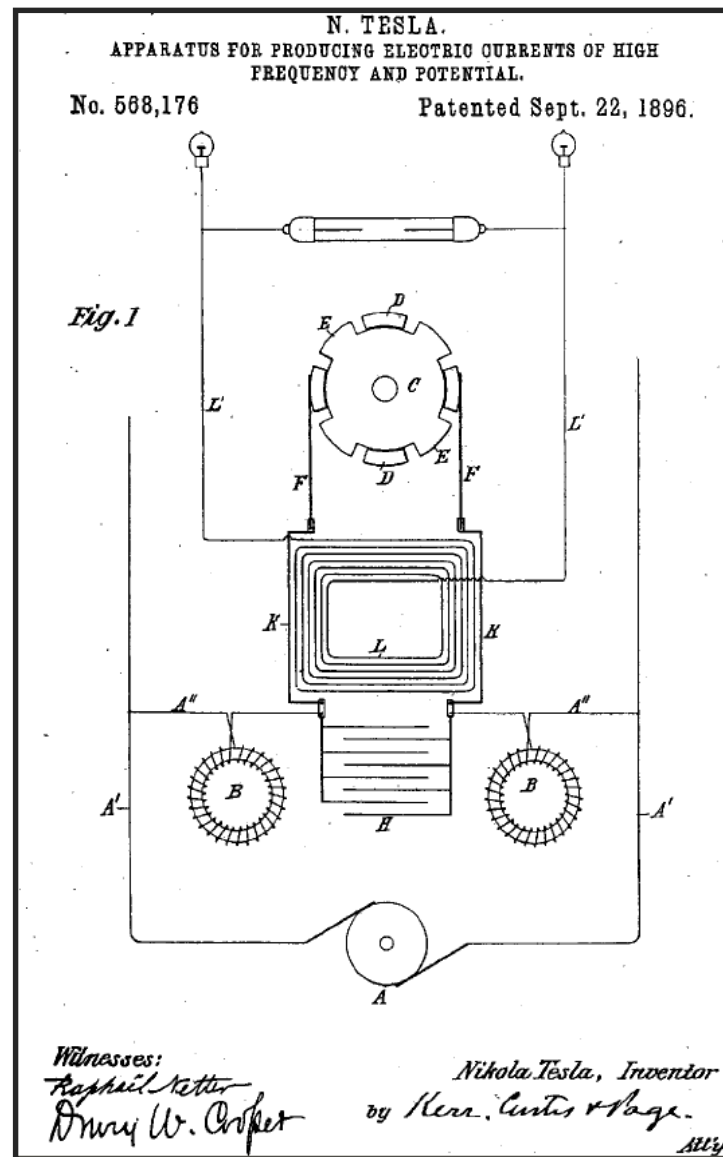
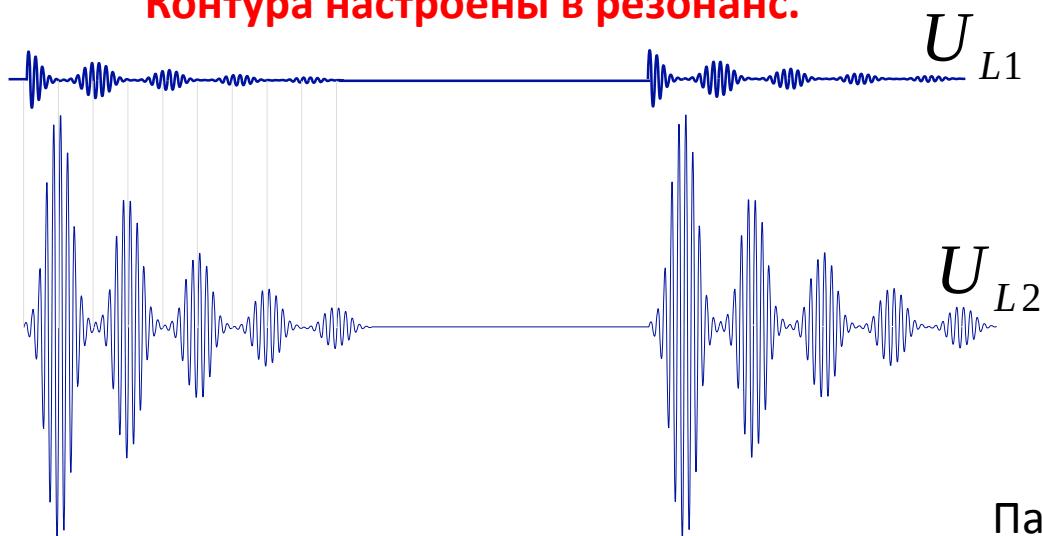
Трансформатор Тесла

Импульсный резонансный трансформатор с ударным возбуждением



Энергия запасается в емкости – в электрическом поле.

Контура настроены в резонанс.

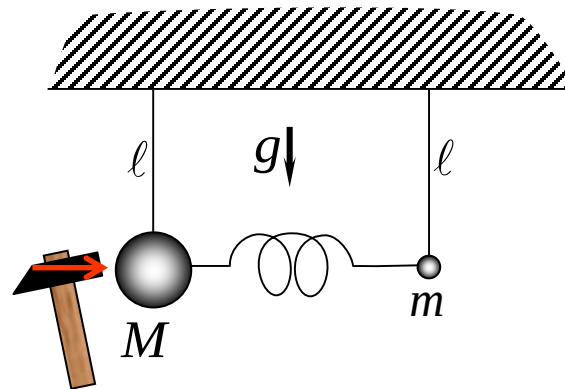


Патент № 568176 от 22 сентября 1896

Механический аналог трансформатора Тесла

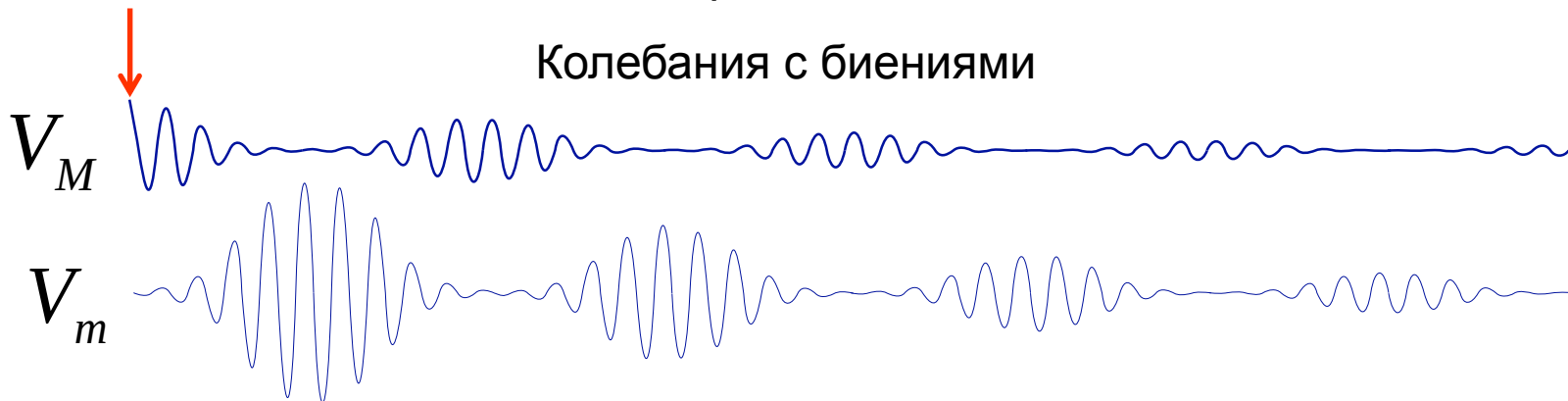
В постановке, когда к раме на одинаковой высоте подвешены шары разной массы, можно наблюдать в процессе биений почти полную передачу энергии от шара с большой массой к шару с малой массой. При этом амплитуда колебаний шара с малой массой будет намного превосходить исходную амплитуду колебаний шара с большой массой.

Механическая модель трансформатора Тесла

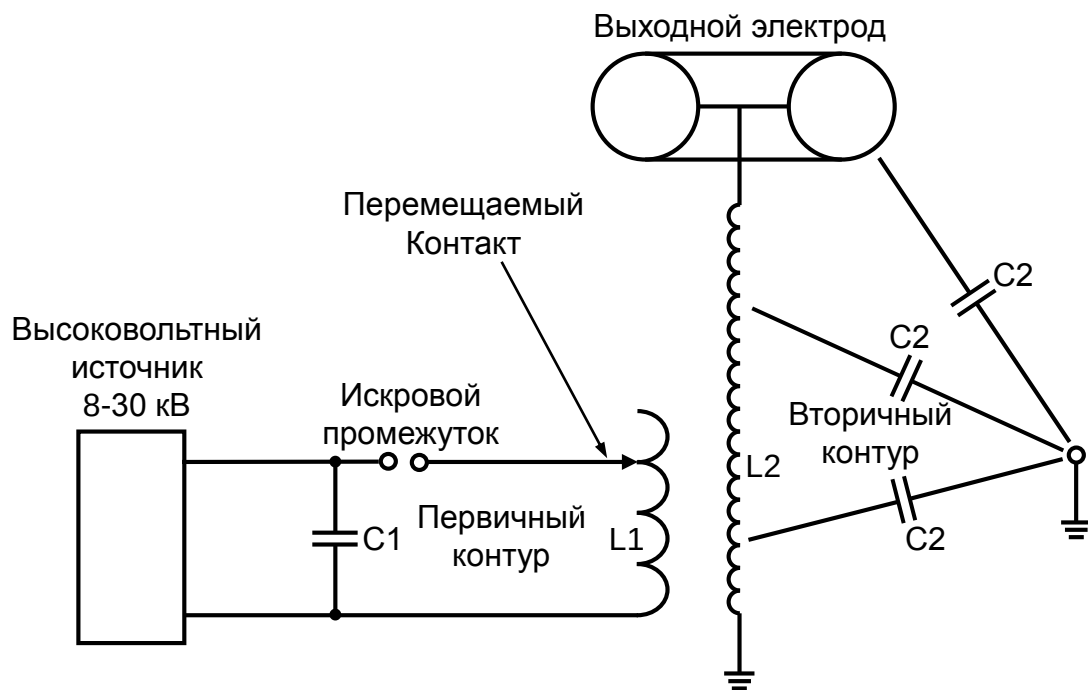
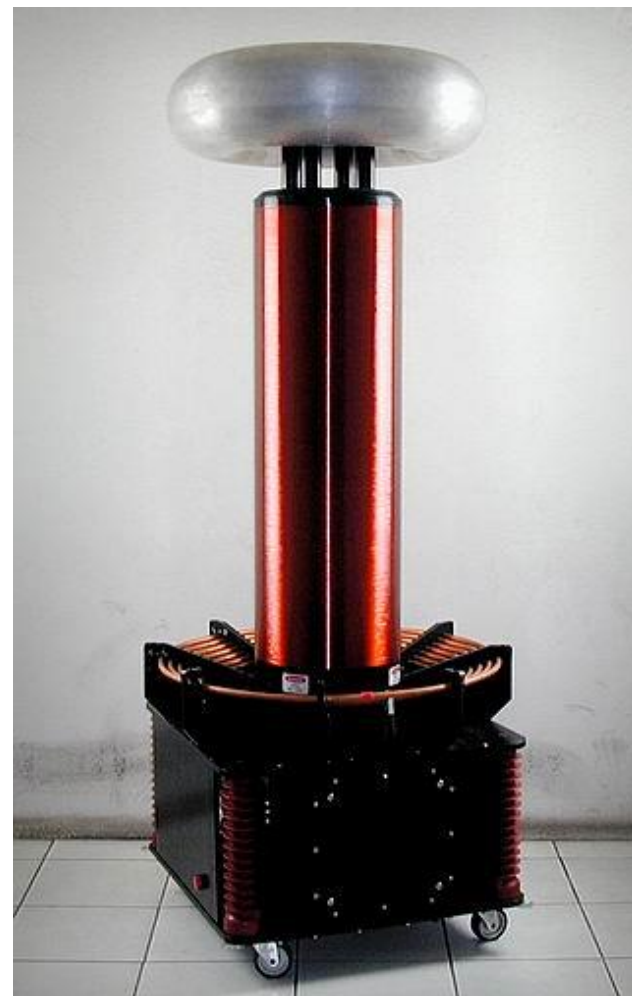


Два осциллятора со слабой связью

Колебания с биениями



Вид классического трансформатора Тесла и его схема



Пример профанации науки и техники

- Статья в Википедии про трансформатор Тесла
http://ru.wikipedia.org/wiki/Трансформатор_Тесла:
«В наши дни **трансформатор Тесла не имеет широкого практического применения**. Он изготавливается многими любителями высоковольтной техники ради сопровождающих её работу эффектов. Также он иногда используется для поджига газоразрядных ламп и для поиска течей в вакуумных системах».

Далее в упомянутой
статье Википедии
идёт:

Трансформатор Тесла в культуре

В фильмах

В компьютерных играх

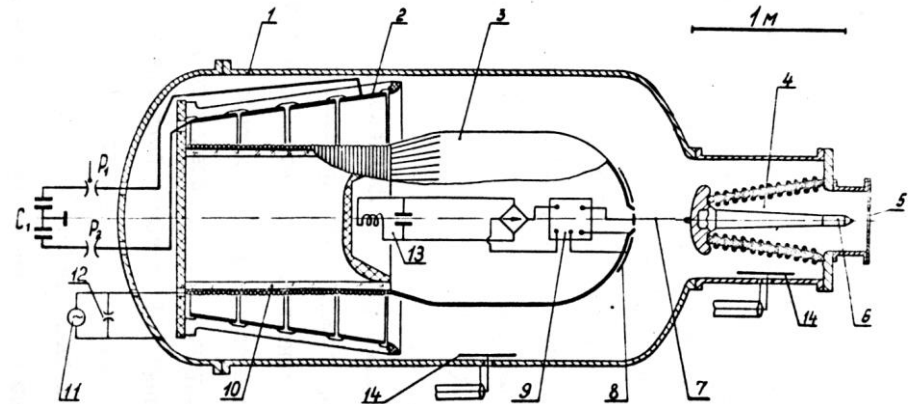
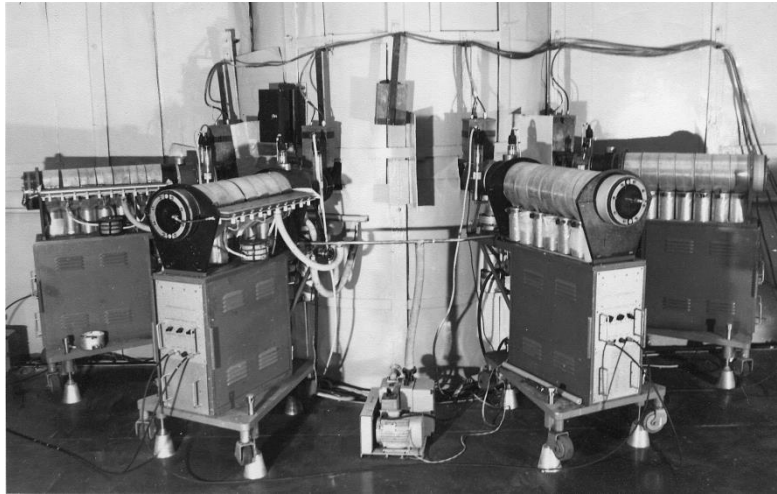
В музыкальном искусстве

В шоу-бизнесе

Пример применения. Любительские конструкции



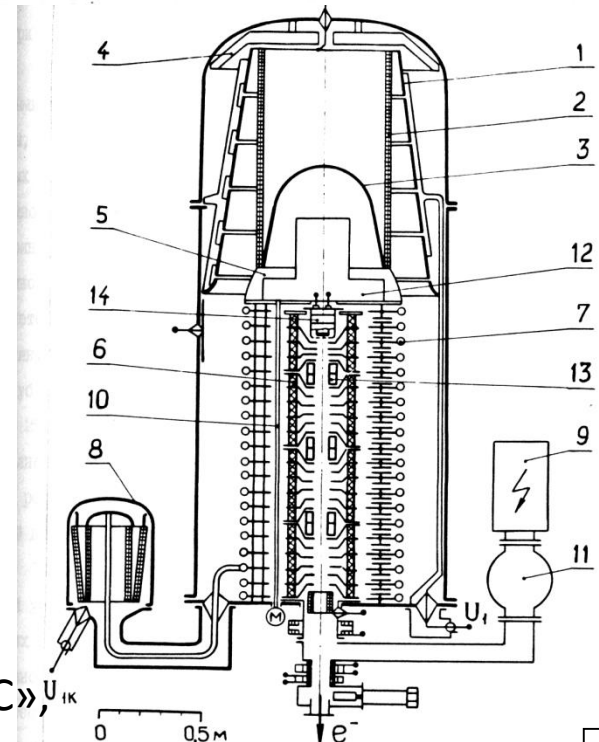
Ускорители – трансформаторы Тесла – мощность $10^8 \div 10^{11}$ Вт !



ИГил СО РАН – импульсные рентгеновские аппараты серии ПИР для съемки взрывных процессов.



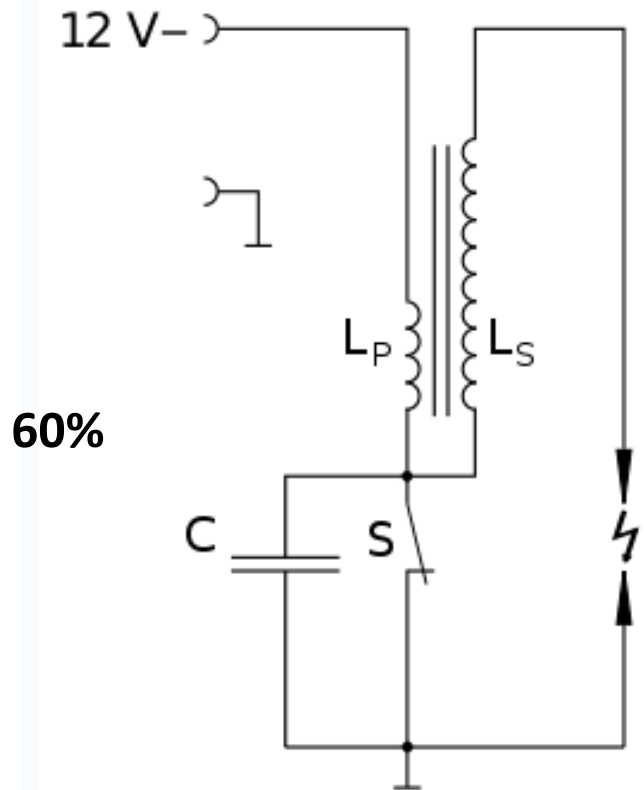
ИЯФ СО РАН – Промышленные ускорители типа «Акваген», «РИУС», «Элит», «ЭЛВ» и др.



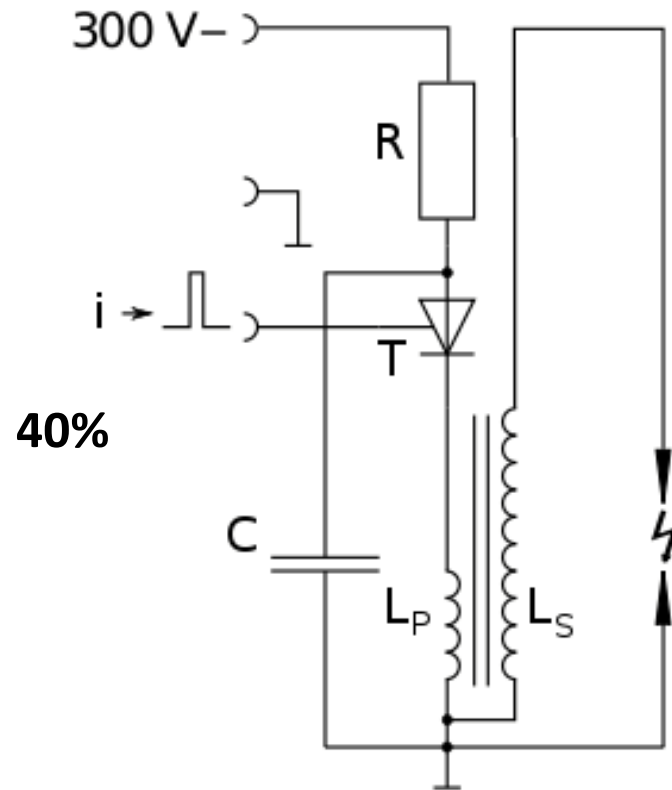
Ускоритель ЭЛИТ-3А.

На самом деле, тр-р Тесла часто используется в настоящее время во многих устройствах

Катушки зажигания ДВС. Тираж – сотни миллионов шт.



Катушка Румкорфа

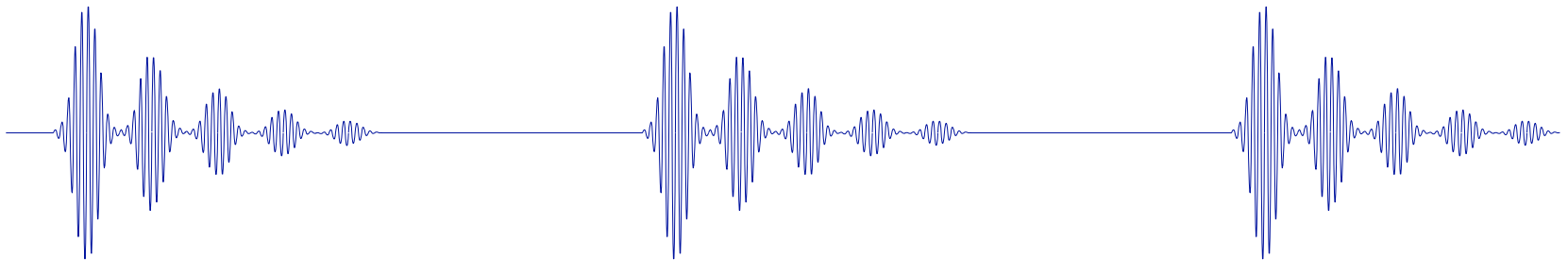


Трансформатор Тесла

Эксперименты

- Опыты с разрядами.
- Почему разряд, проходящий через человека не убивает?
- Токи смещения. Барьерный разряд.
- Стоячая волна вдоль второй катушки (виток с лампочкой).

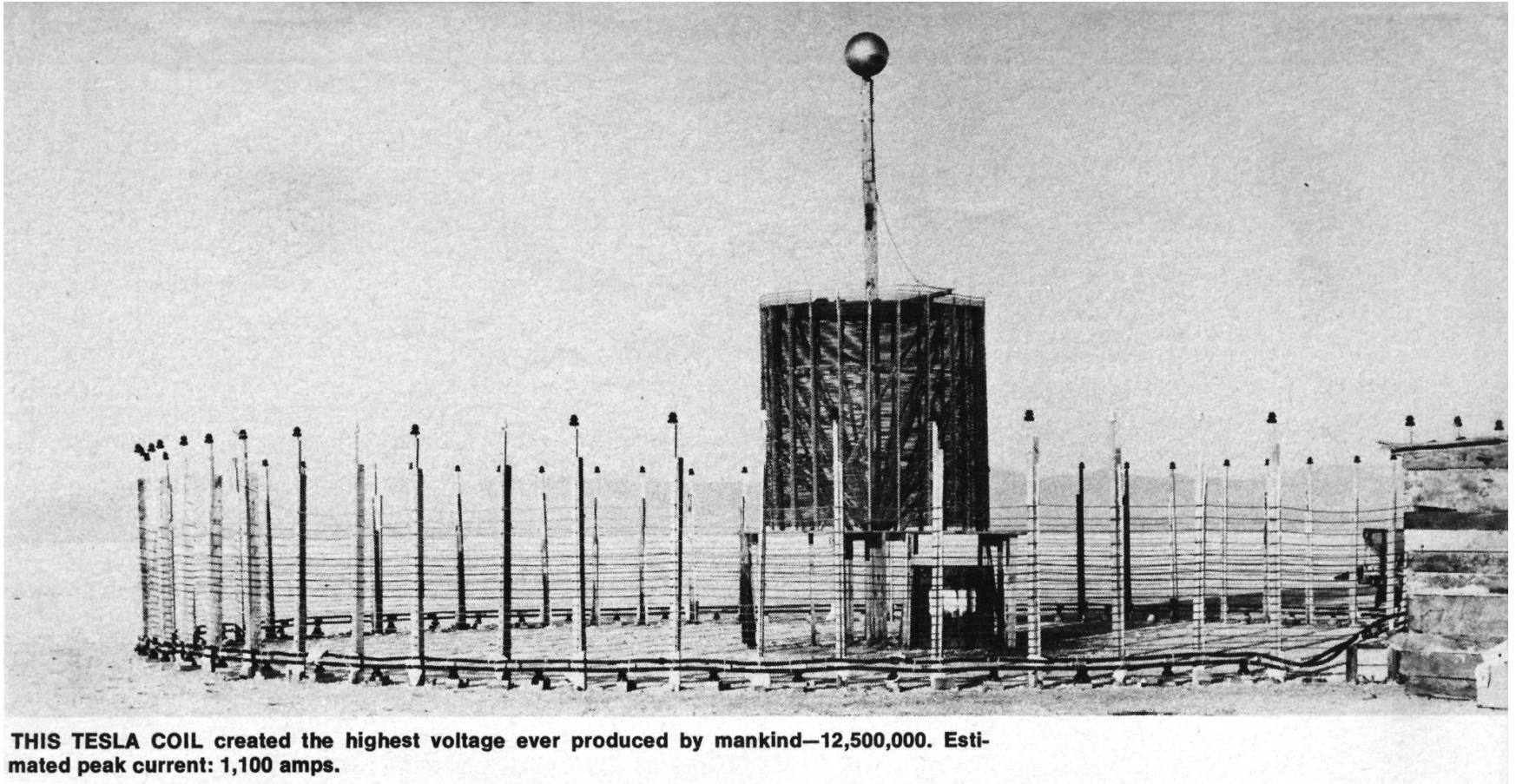
Форма импульсов на выходе трансформатора Тесла



- Частота колебаний 100-300 кГц.
- Биения – 10-30 кГц.
- Частота следования пачек импульсов – 10-20 Гц.



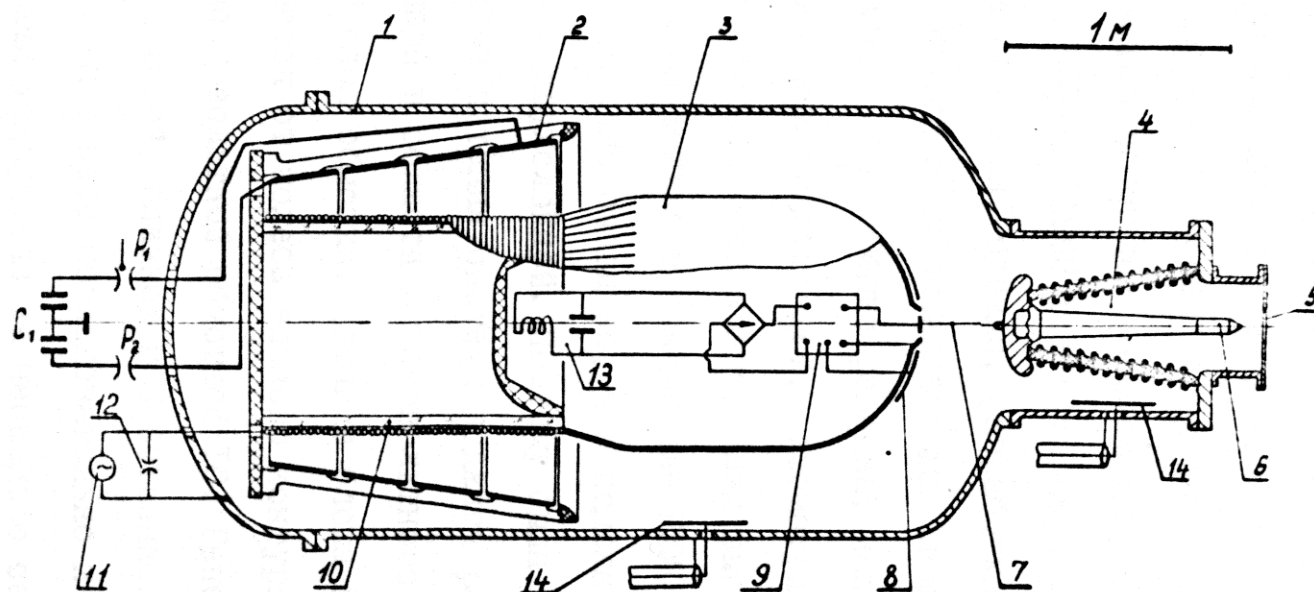
Большой трансформатор Тесла



К. Голка – копия модели трансформатора Тесла



Ускорители – трансформаторы Тесла. Например, РИУС-5 меньше размером и мощнее



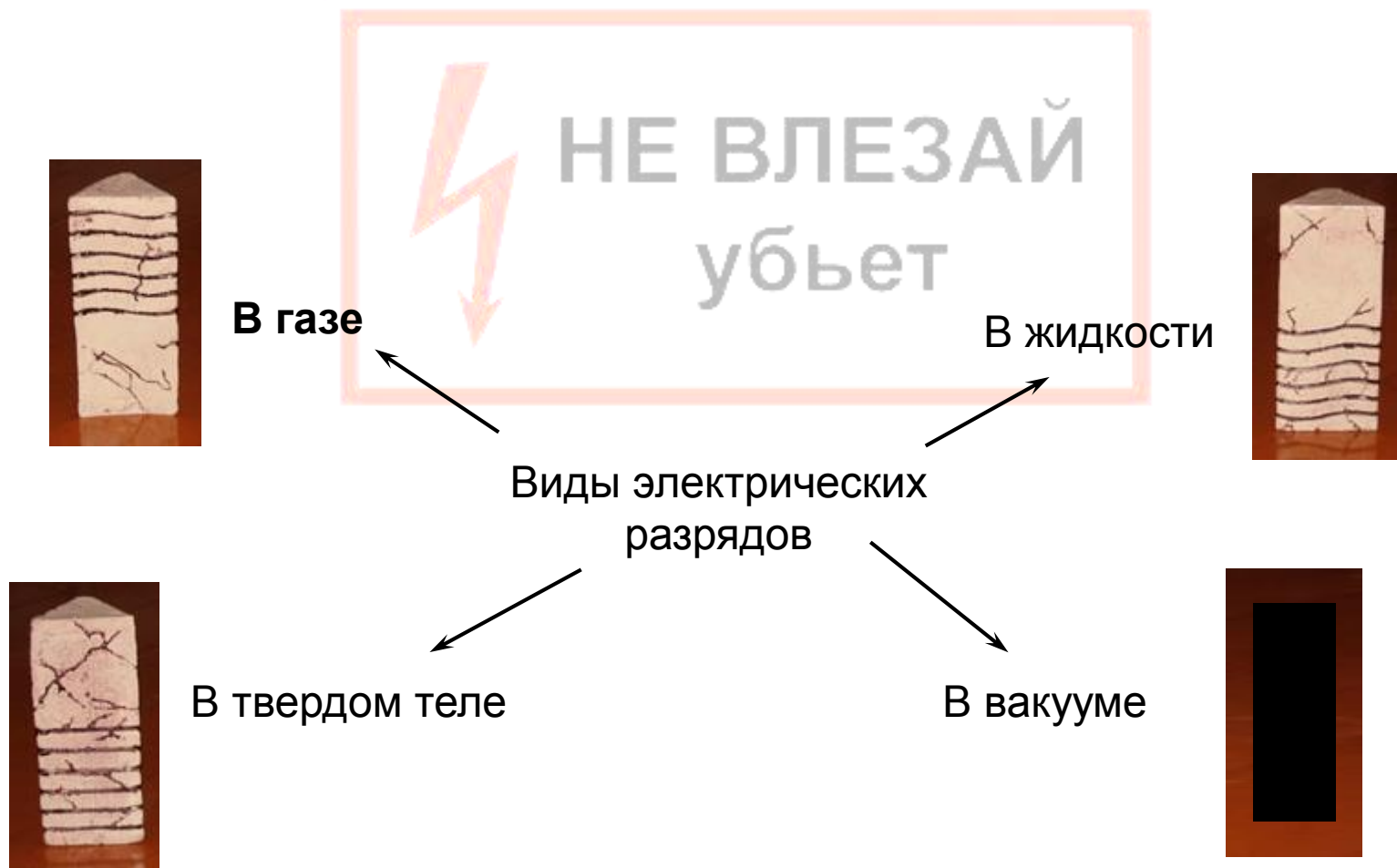
Наиболее часто используются два режима генерации излучения. В них получены: ток электронов 5 и 7 кА; ускоряющее напряжение 3 и 2 МВ; длительности импульсов излучения 15 и 35 нс; мощность дозы до $1 \cdot 10^{11}$ Р/с.

Ускоритель РИУС-5.

1 – котел; 2 – первичная обмотка; 3 – высоковольтный электрод (кондуктор); 4 – ускорительная трубка (диод); 5 – мишень (или фольга); 6 – взрывоэмиссионный эмиттер; 7 – газовый промежуток разрядника-обострителя; 8 – емкостный делитель; 9 – блок поджига; 10 – высоковольтная (вторичная) обмотка; 11 – генератор 30 кГц; 12 – защищающий разрядник; 13 – колебательный контур; 14 – емкостный делитель напряжения.

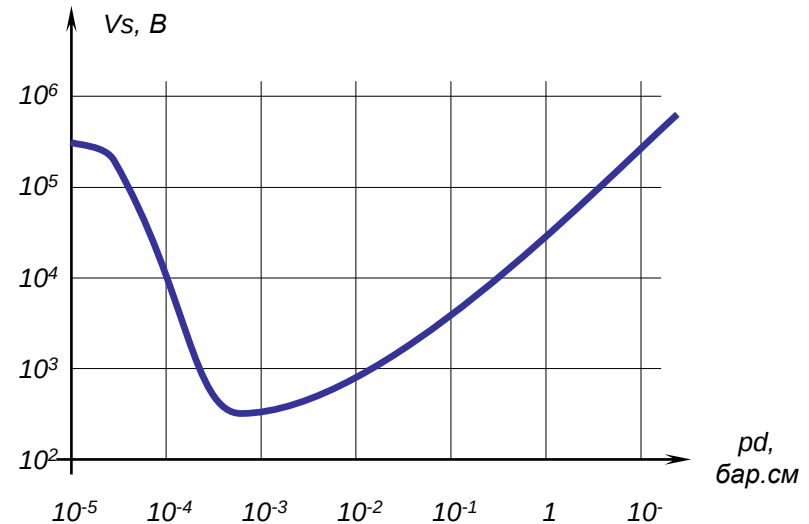
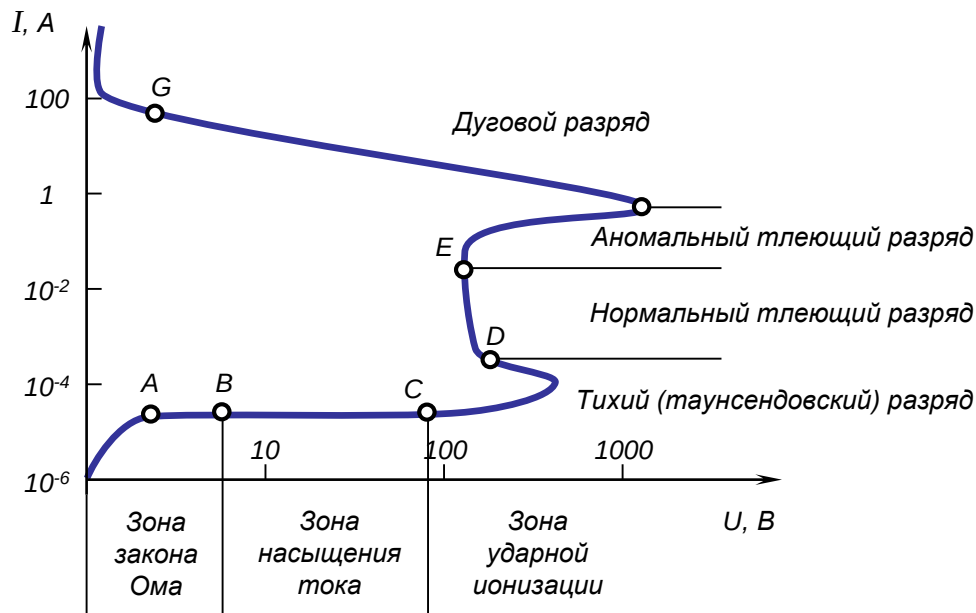
Из-за элегаза плотность электрической энергии в нем в 50 раз больше, чем в воздухе

Виды электрических разрядов



Виды разрядов в газе

Вольтамперная характеристика газового разряда Основные виды газового разряда



$$U = \frac{a(pd)}{\ln(pd) + b}$$

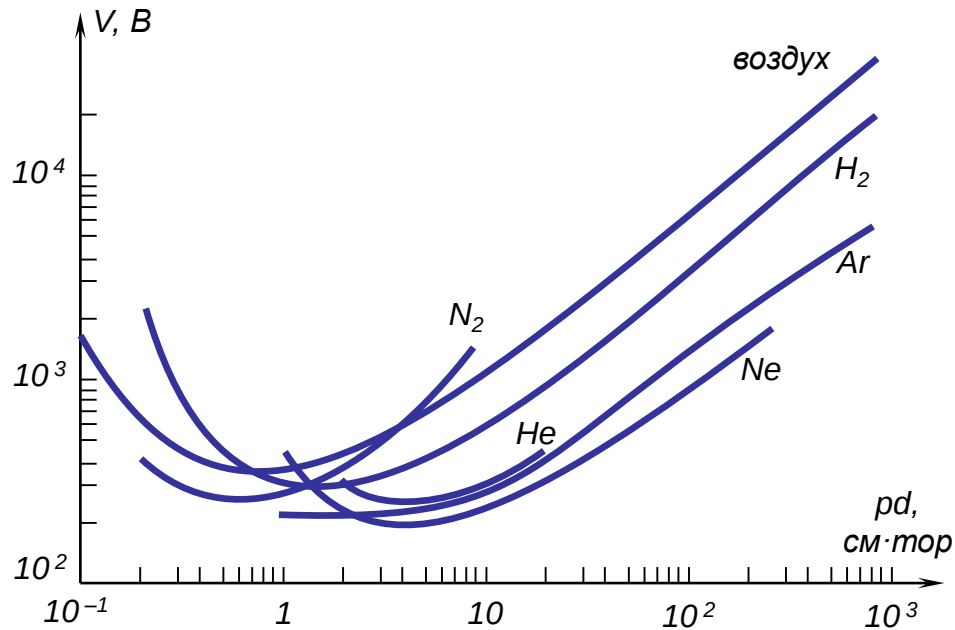
U — напряжение пробоя

p — давление,

d — расстояние между электродами.

a и b — константы, зависят от состава газа

Кривая Пашена



Тлеющий разряд

Условие возникновения и поддержания тлеющего разряда:

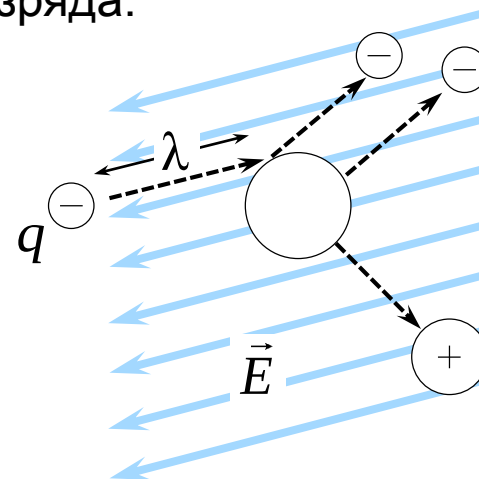
$$q \cdot E \cdot \lambda > W_{\text{ионизации}}$$

q – заряд электрона

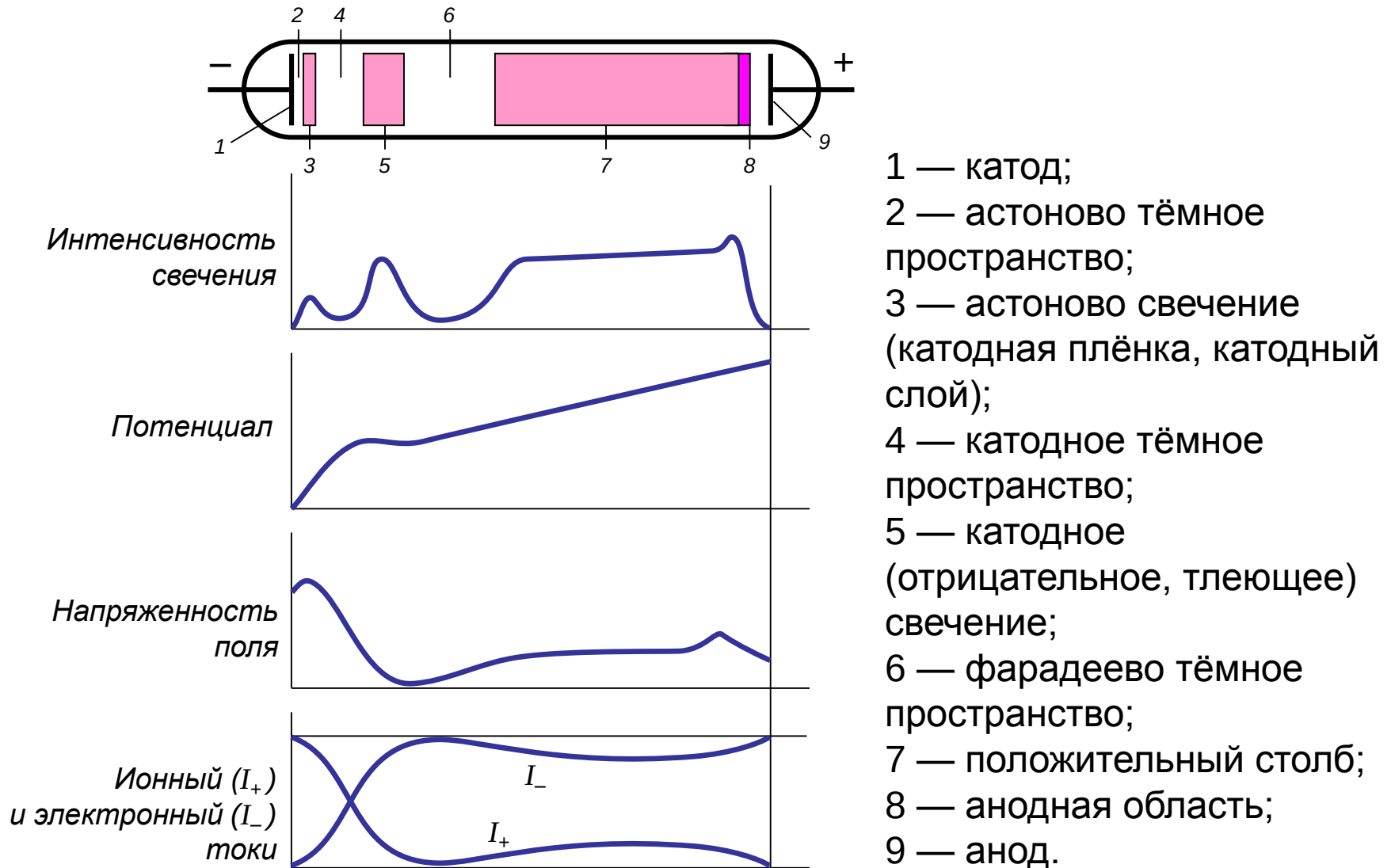
E – напряженность электрического поля

λ – длина свободного пробега

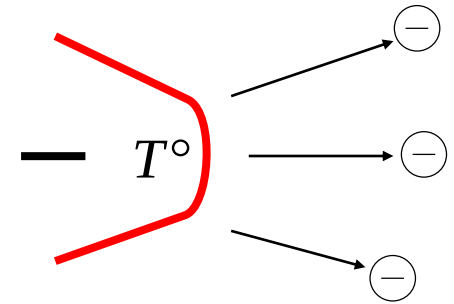
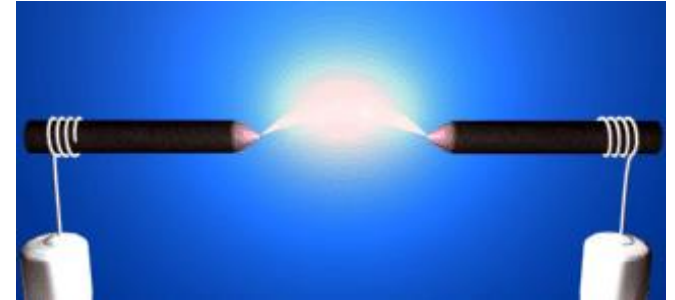
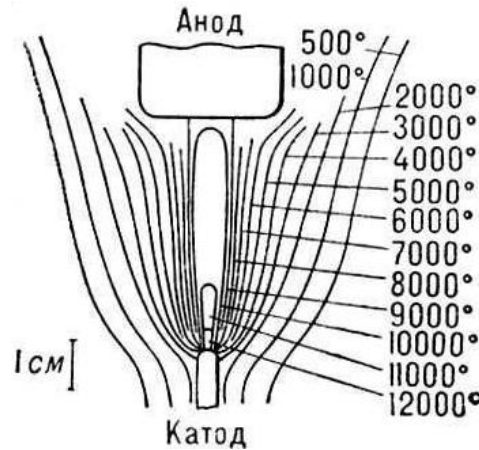
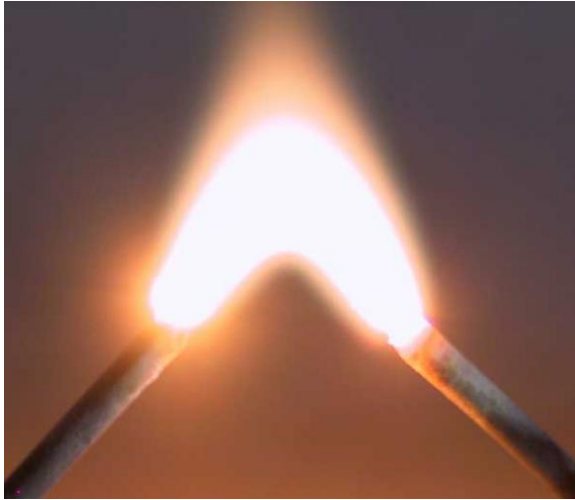
W – энергия ионизации



Параметры тлеющего разряда

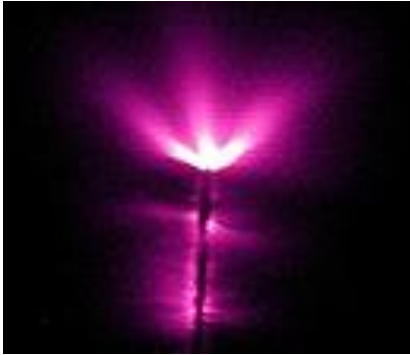


Дуговой разряд



- Условие возникновения – термоэлектронная эмиссия с нагретых электродов

Коронный разряд



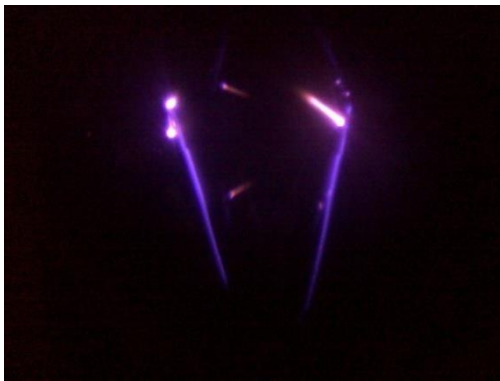
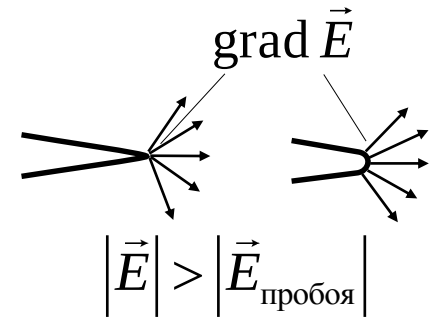
Коронный статический разряд

Условия возникновения:

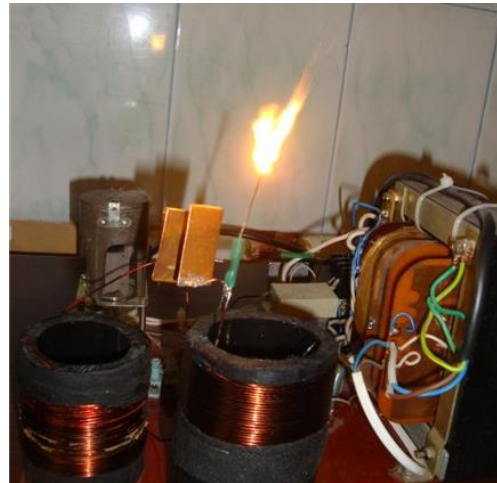
- высокий градиент электрического поля;
- напряженность выше пробивной для ударной ионизации.

Характеристики:

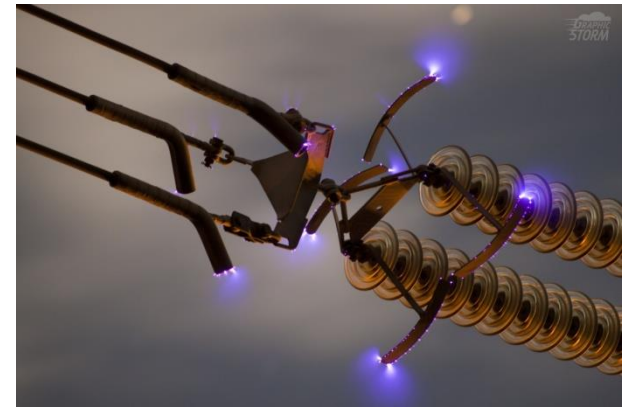
- видимая цепь разряда не замкнута;
- свечение вблизи электрода;
- возникает на остриях.



Коронный ВЧ разряд

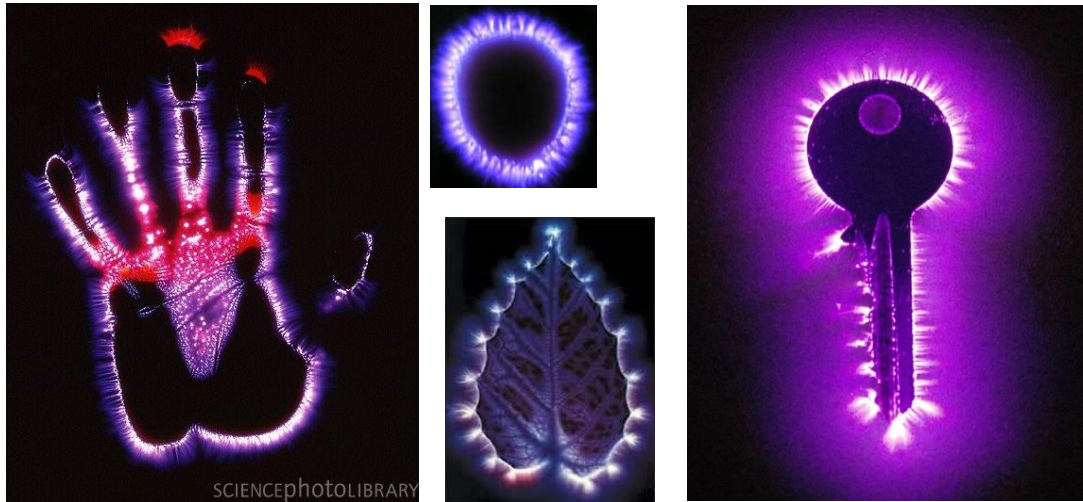


Факельный ВЧ разряд



Разряд на ЛЭП в дробящихся каплях после дождя (огни святого Эльма)

Барьерный разряд

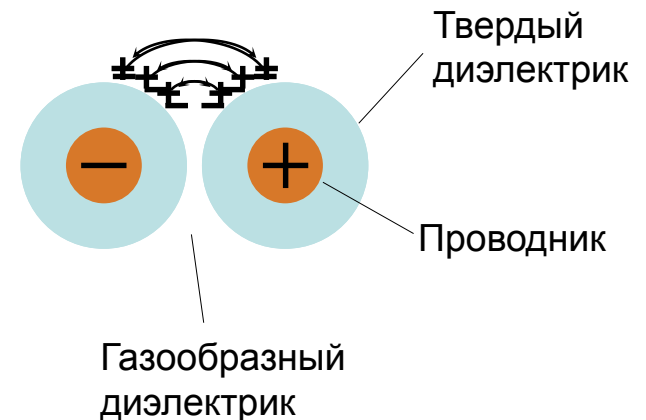
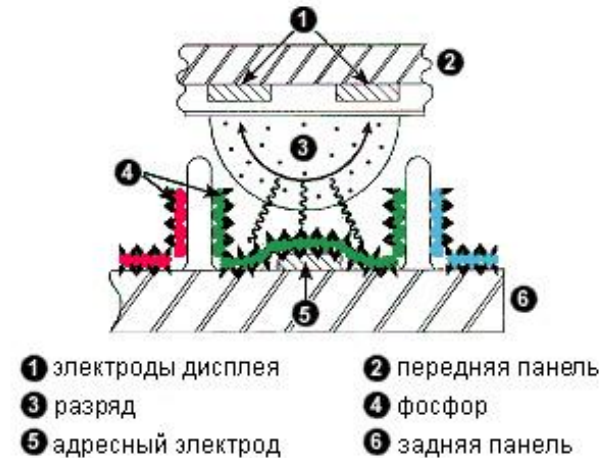


Кирлиан-фотографии

Условия возникновения:

- Периодическая смена полярности
- Граница раздела диэлектриков с разной диэлектрической проницаемостью (напр. воздух / твердый диэлектрик)
- Электрическая прочность одной среды (твердого диэлектрика) гораздо больше другой (воздуха)

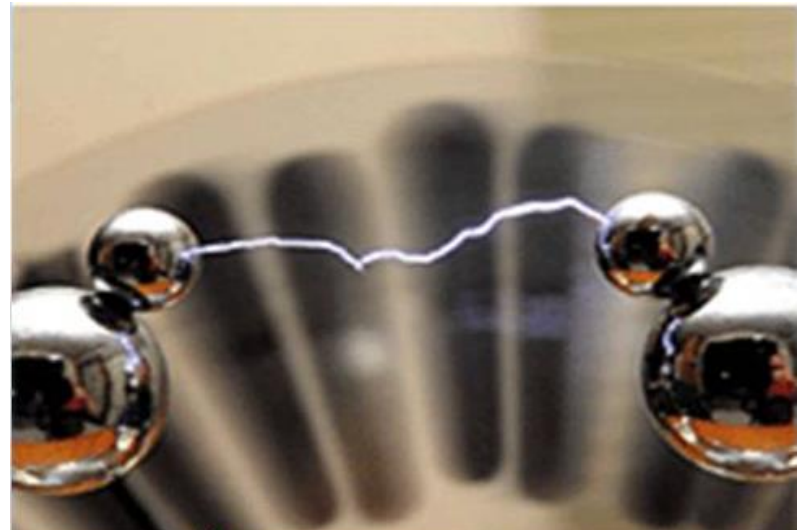
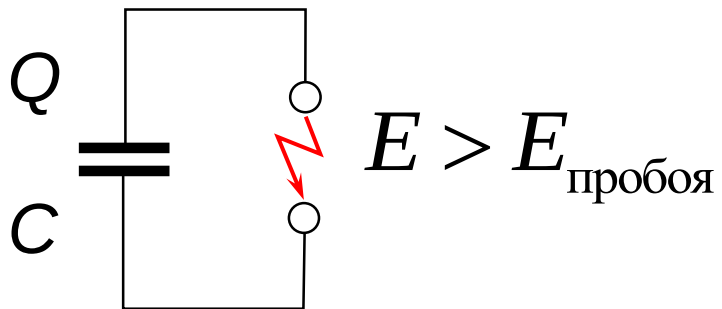
Плазменный монитор



Искровой разряд

Условия возникновения:

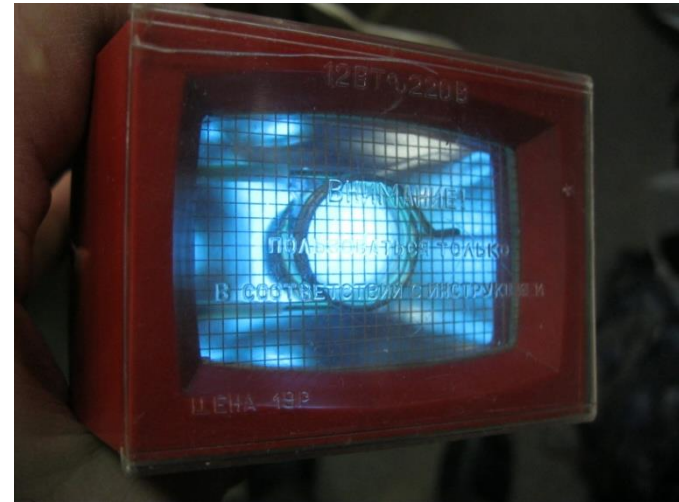
- наличие емкости с накопленным зарядом;
- напряженность поля больше пробивной.



Искровой разряд



СВЧ разряд и оптический пробой



Лазерное излучение. В фокусе лазерного пучка образуется сгусток плазмы — искра.

Можно обойтись без электродов

Особенности сильноточной электроники

- Высокие порядки напряжений, токов и мощностей
- Высокие токи смещения (в том числе, в пустоте)
- Высокие напряжения магнитной индукции (в том числе на предметах со сплошной металлической поверхностью)

- Резкий скин-эффект (Eddy Currents)

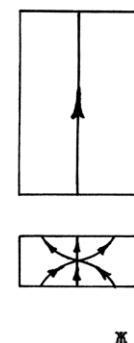
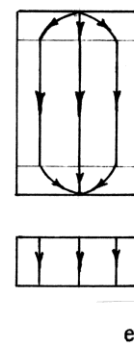
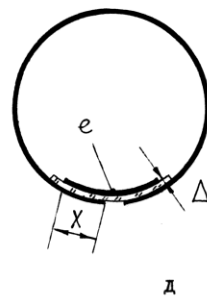
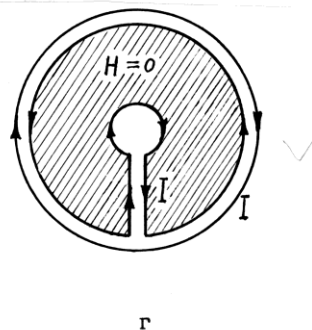
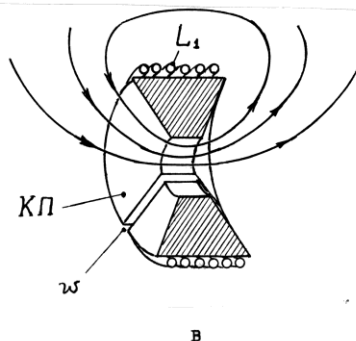
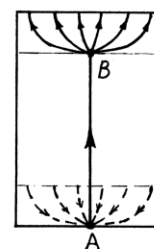
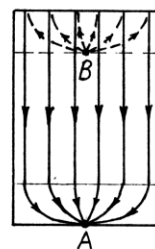
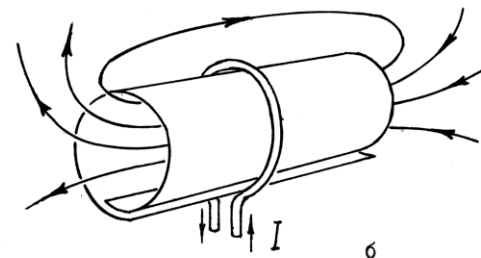
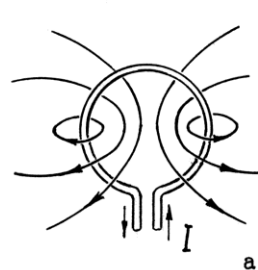
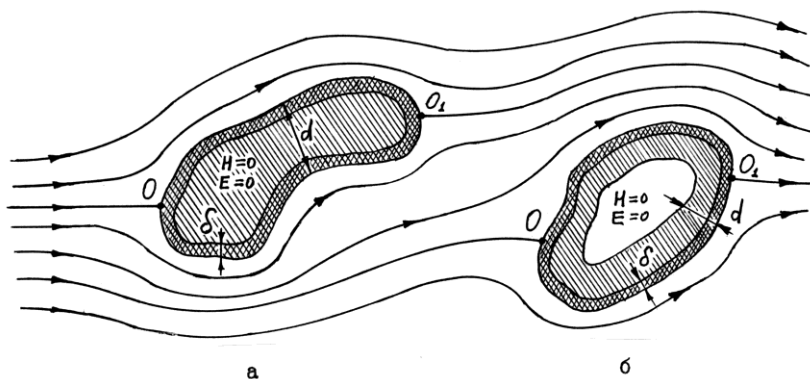
$$\delta \sim \sqrt{\rho \cdot \tau}$$

- Взрывная эмиссия при $\frac{dU}{dt} \geq 10^{14} \frac{B}{c}$

- Магнитная изоляция
- Ограничение силы тока в электронном пучке в пустоте

$$I \leq 17000 \text{ A}$$

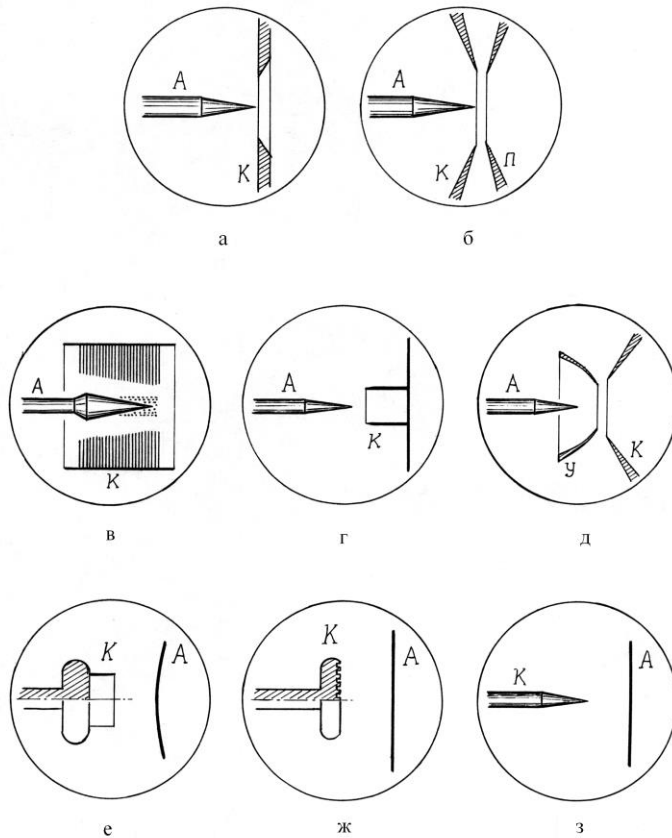
Влияние скин-эффекта на форму магнитных полей и токов



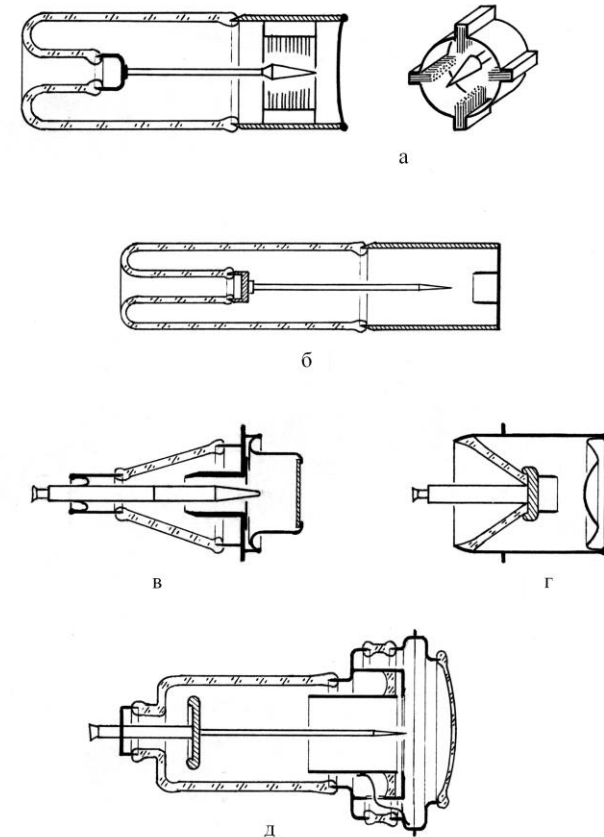
Концентратор магнитного потока

Скин-экран

Взрывная эмиссия электронов. Рентгеновские импульсные источники.



Системы электродов



Импульсные рентгеновские трубки

Емкостные и индуктивные накопители энергии

Проблемы энергообеспечения физических установок

- Электросеть – до 100 кВт на лабораторию.
- Двигатели турбина, ДВС – порядка мегаватта.
- А если нужно 1000 МВт? Даже электростанции может не хватить.
- Идея: медленно накопить энергию, а затем быстро её изъять и использовать.

Энергетическое обеспечение установок

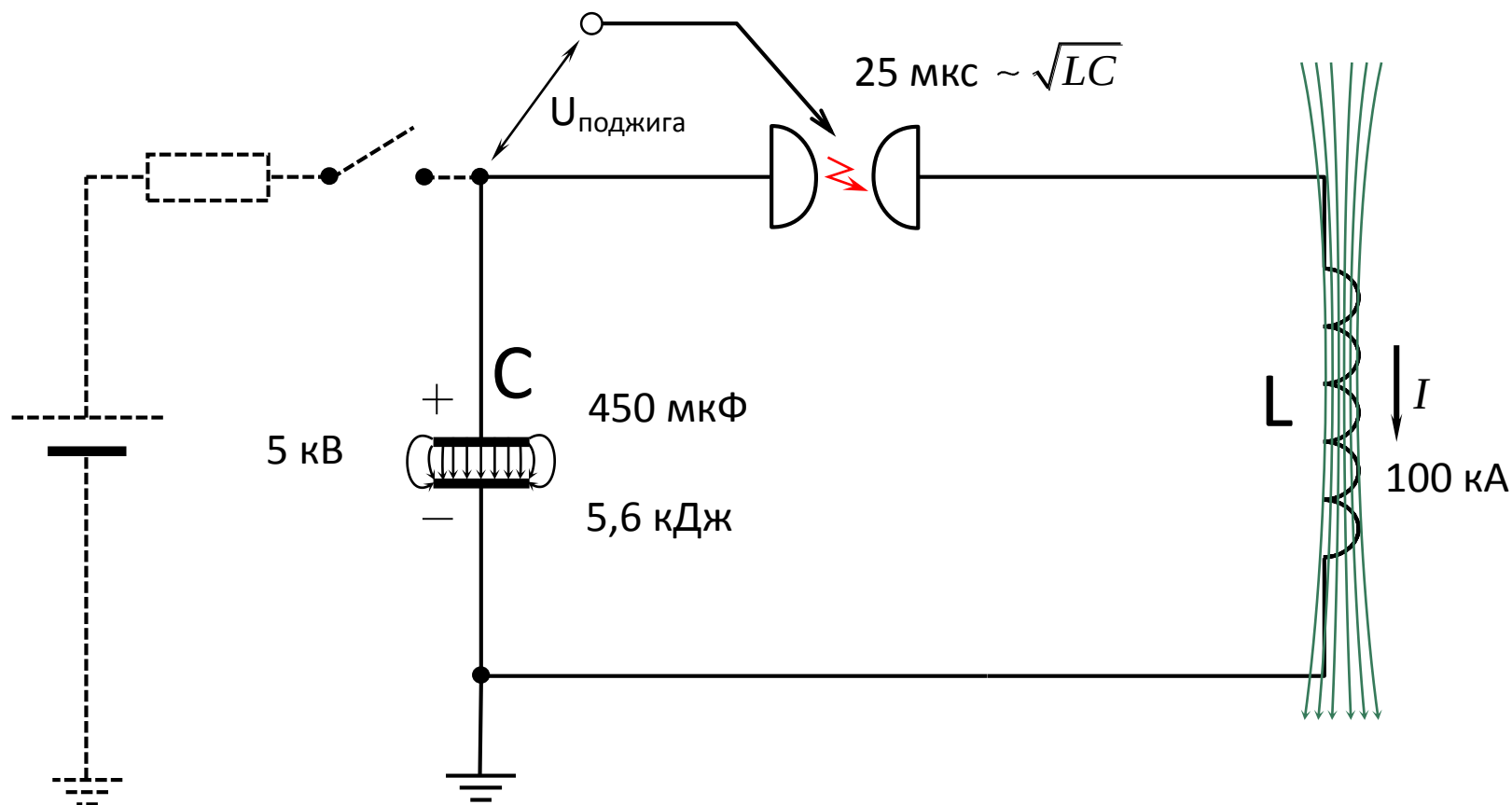
Накопители энергии

- **Химические (взрывные) накопители**
1 кг $\Leftrightarrow \sim 5 \cdot 10^6$ Дж

- **Емкостные накопители (в электрическом поле)** $\frac{CU^2}{2}$
Ограничение ~ 200 кВ/см (электрическая прочность).
- **Индуктивные накопители (в магнитном поле)** $\frac{LI^2}{2}$
Ограничение ~ 50 Тесла (механическая прочность).

- **Механические (кинетические) накопители. Маховики** $\frac{mV^2}{2}$
3 км/с $\Leftrightarrow$ 1 кг химического ВВ
(ограничение – механическая прочность)
- **Ядерный (Термоядерный) заряд**
 ^{235}U , 1 кг $\Leftrightarrow 20$ кТ $\Leftrightarrow 5 \cdot 10^{14}$ Дж
- **Импульсные пучки (сгустки) электронов**
- **Импульсные пучки (сгустки) фотонов**

Схема установки



Обжатие проводящей оболочки давлением магнитного поля

Фотографии процесса обжатия



Фотографии цилиндров после обжатия

Плотность энергии W на единицу объема – давление поля P

Электрическое поле

Магнитное поле

Система СИ:

$$W_E = P_E = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$$

$$W_H = P_H = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Система СГС:

$$W_E = P_E = \frac{\epsilon E^2}{8\pi}$$

$$W_H = P_H = \frac{\mu H^2}{8\pi}$$

Величина энергии на единицу объема (ее плотность) и сила, приложенная к единице площади (давление) имеют одинаковую размерность. Они выражаются одинаковыми формулами.

В накопителях и схемах их использования (в схемах питания установок) появляются сильные импульсные токи, высокие импульсные напряжения.

Сильноточная электроника

Особенности сильноточной электроники

Высокие производные токов и напряжений.

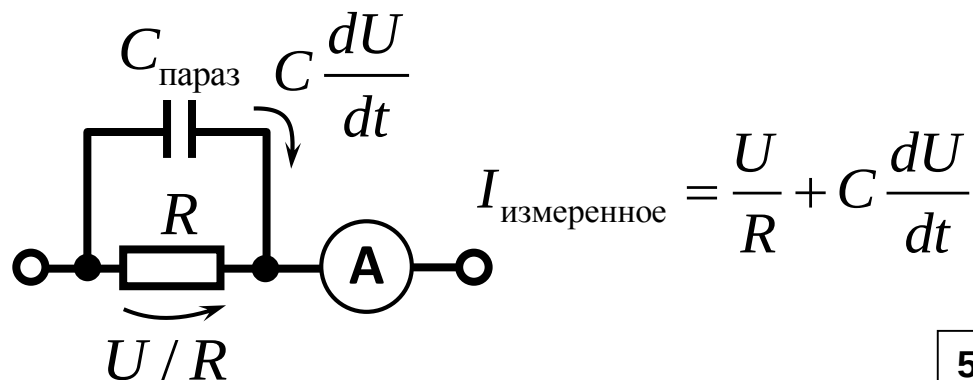
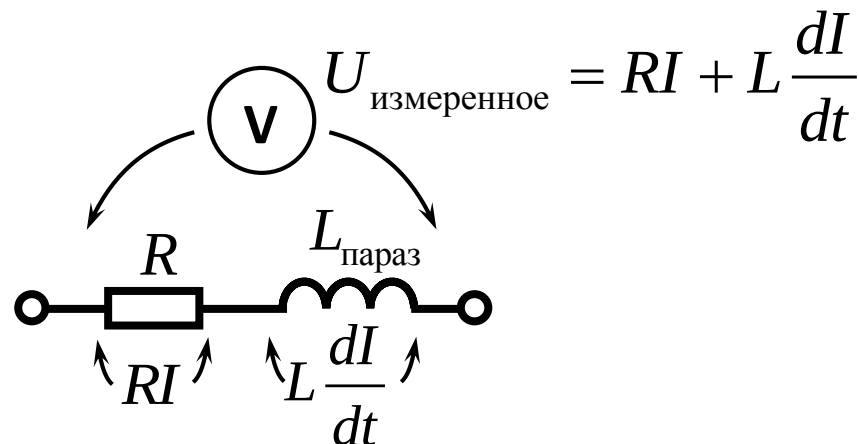
Условия:

- Напряжение на элементе цепи с сопротивлением R .

$$L_{\text{параз}} \frac{dI}{dt} \geq RI$$

- Ток через элемент цепи с сопротивлением R .

$$C_{\text{параз}} \frac{dU}{dt} \geq \frac{U}{R}$$



Особенности сильноточной электроники

- Высокие порядки напряжений, токов и мощностей
- Высокие токи смещения (в том числе, в пустоте)
- Высокие напряжения магнитной индукции (в том числе на предметах со сплошной металлической поверхностью)

$$\delta \sim \sqrt{\rho \cdot \tau}$$

- Резкий скин-эффект (Eddy Currents)

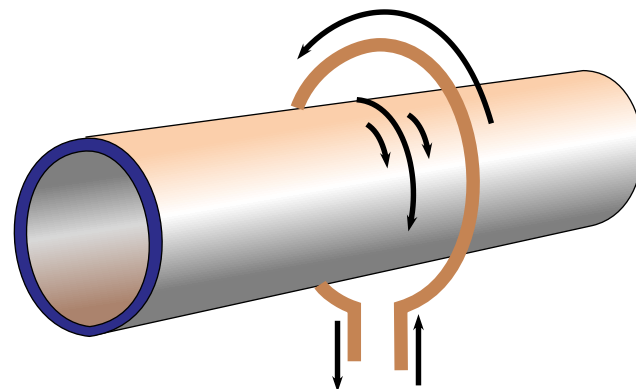
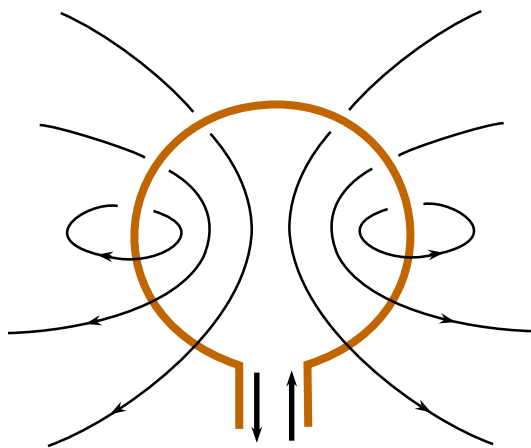
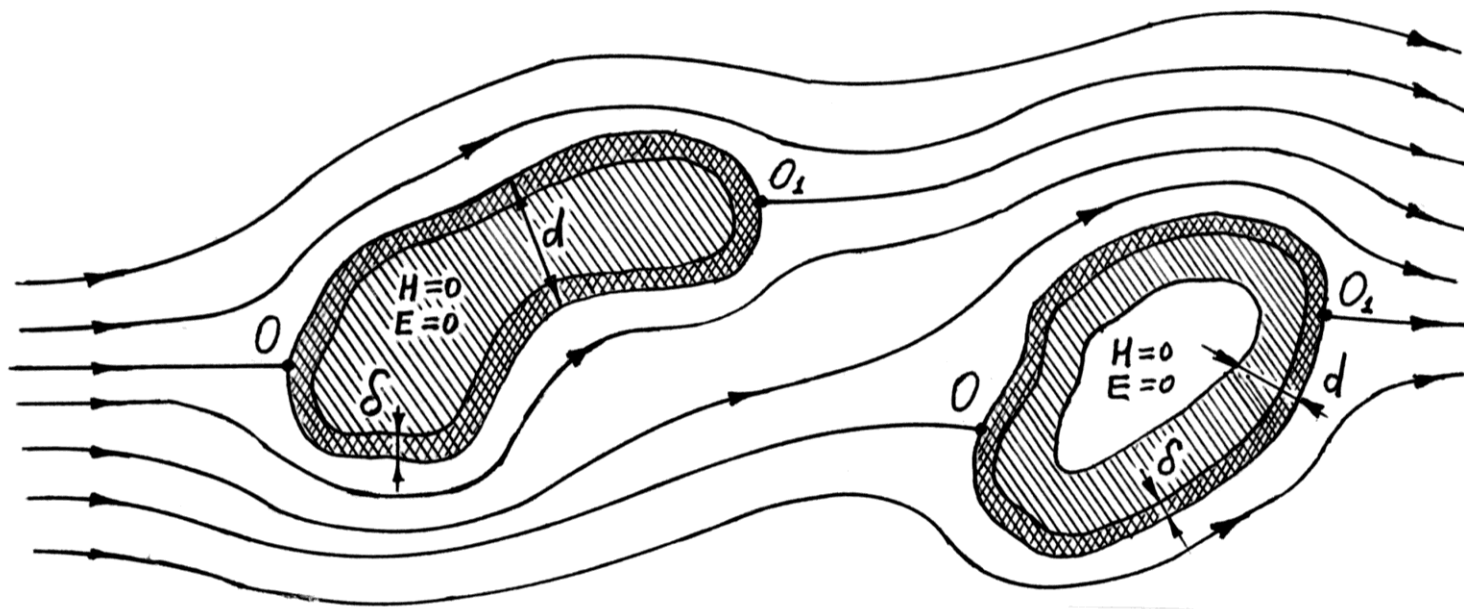
- Взрывная эмиссия при $\frac{dU}{dt} \geq 10^{14} \frac{B}{c}$

За 1 с магнитное поле и ток проникают в медь на глубину 10 см.

За 1 миллионную долю секунды – на глубину 100 мкм.

- Магнитная изоляция
- Ограничение силы тока в электронном пучке в пустоте $I \leq 17000 \text{ A}$

Влияние скин-эффекта на форму магнитных полей и токов



Электрические коммутаторы

- Лампы
- Тиратроны
- Транзисторы
- Тиристоры
- Разрядники
- Взрывающиеся проволочки
- Взрывные размыкатели
- Плазменные размыкатели



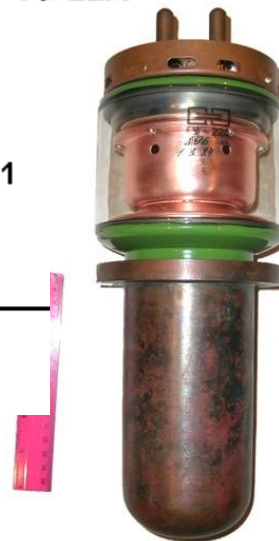
Лампы, Тиратроны



75-мегаваттный клистрон,
частота 11.4 GHz,
импульсы до 3 мкс



ГУ-22А



Напряжения – до 100 кВ, Токи – до 1000 А, Фронты ~ 1 нс

Блок питания лазера на свободных электронах



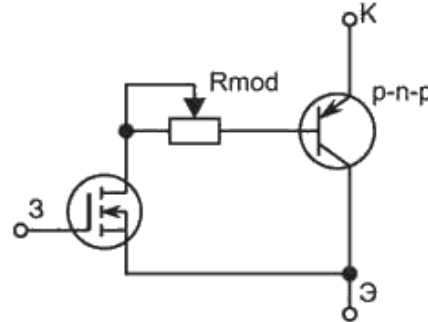
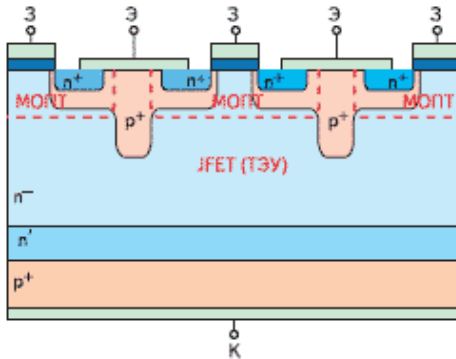
Мощность 3,5 мегаватт – непрерывно. СВЧ-резонаторы питаются лампами – мощными тетрами.

Блок питания лазера на свободных электронах

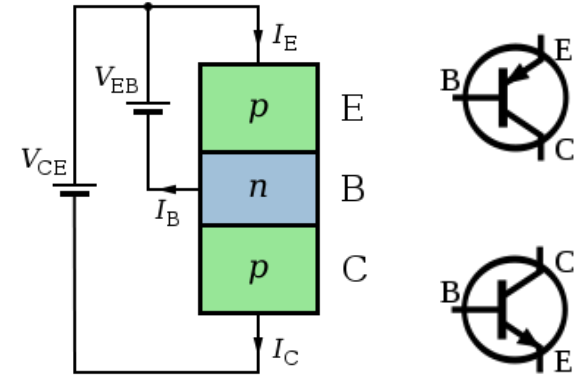


Самый мощный в мире лазер в терагерцовом диапазоне (400 Ватт). Место расположения – Новосибирск, Академгородок (здание за ИХКГ и ИГиЛ)

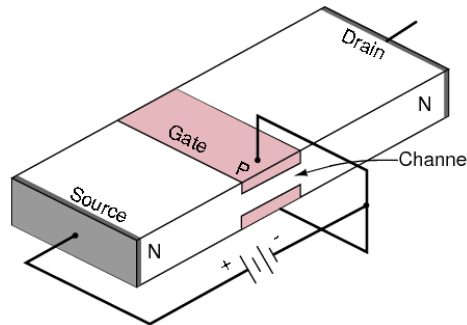
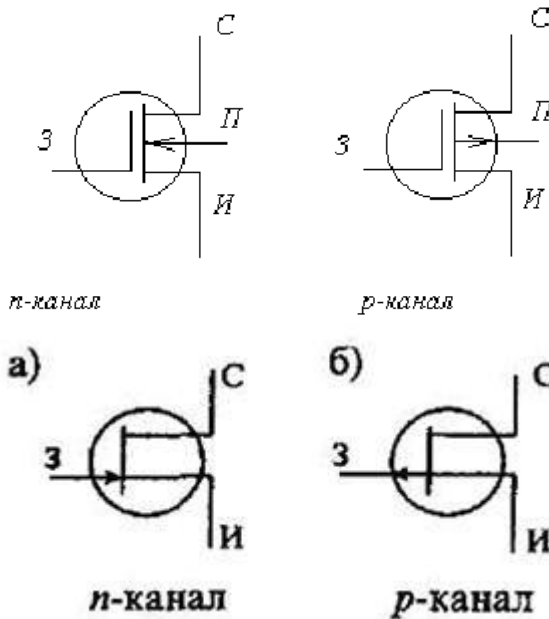
Транзисторы



IGBT



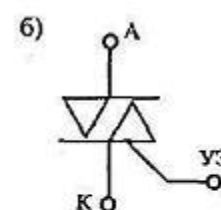
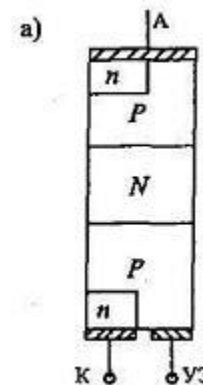
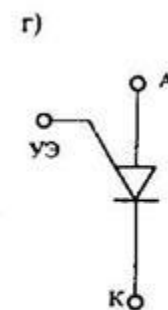
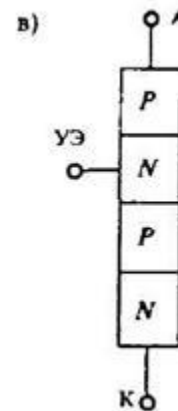
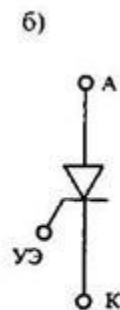
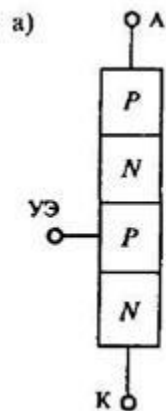
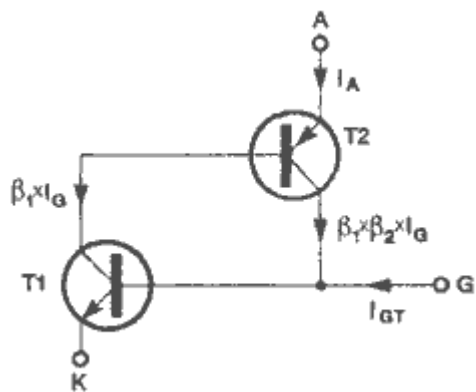
Биполярные



Полевые

Напряжения – до 2 кВ, Токи – до 1000 А, Фронты ~ 10 нс

Тиристоры



Напряжения – до 4 кВ, Токи – до 10000 А, Фронты ~ 100 нс

Электрические коммутаторы

- Лампы
- Тиратроны
- Транзисторы
- Тиристоры

- Разрядники

- Взрывающиеся проволочки
- Взрывные размыкатели
- Плазменные размыкатели



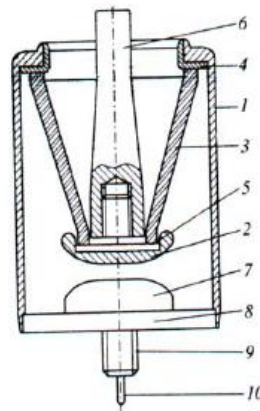
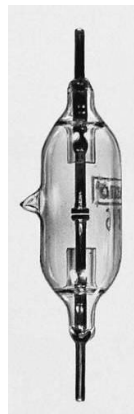
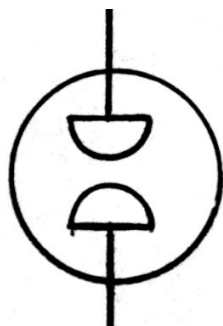
Разрядники

- Газовые

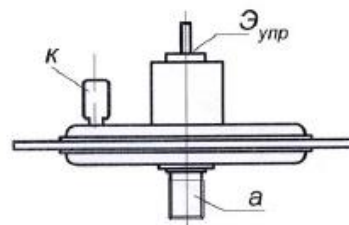
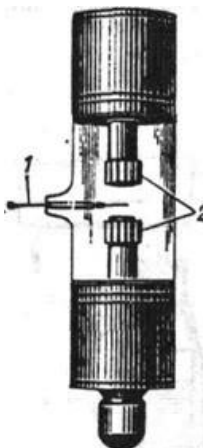
- Жидкостные

- Вакуумные

- Твердотельные



Неуправляемые
(самопробой)



Управляемые
(с поджигом)

Напряжения – до 10000 кВ, Токи – до 100000 А, Фронты ~ 1 нс

Электрические коммутаторы. Разрядники.

Классификация по типу среды

- Газовые
- Жидкостные
- Твердотельные
- Вакуумные

Классификация по принципу работы

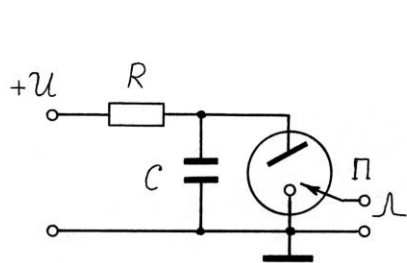
- Неуправляемые
- Управляемые
 - Тригатронные
 - С искажением поля
 - С дежурным тлеющим разрядом
 - С лазерным (волоконно-оптическим) поджигом
 - С поджигом пучком электронов



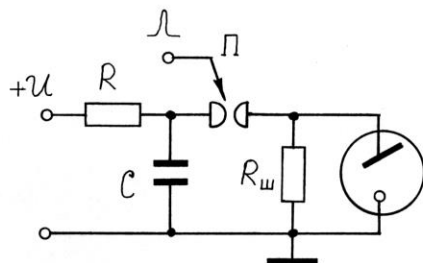
Методы получения импульсных высоких напряжений и токов

- Генератор Аркадьева-Маркса
- Трансформатор Тесла в ударном режиме
- Индуктивный накопитель с взрывным размыкателем
- Каскадный генератор Фитча – Хауэлла
- Спиральный генератор Белкина – Фитча
- Трансформатор Льюиса
- Ступенчатые линии
- Взрывные магнитно-кумулятивные системы

Методы получения мощных коротких электрических импульсов. Простейшие схемы.

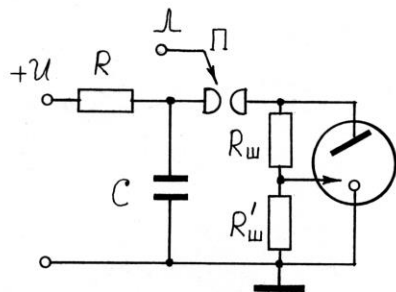


а

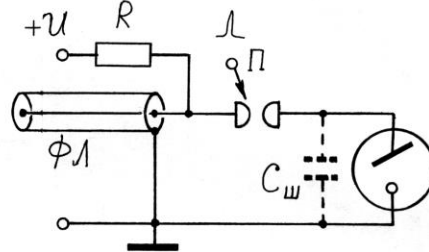


б

Емкость

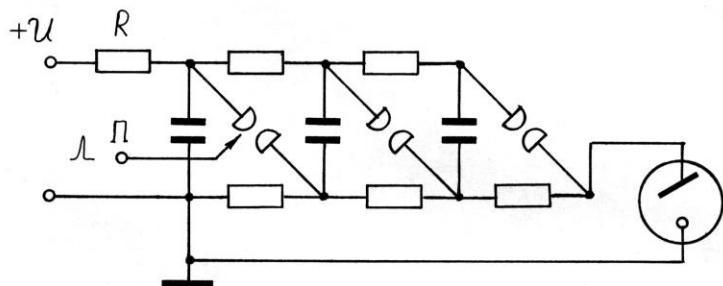


в

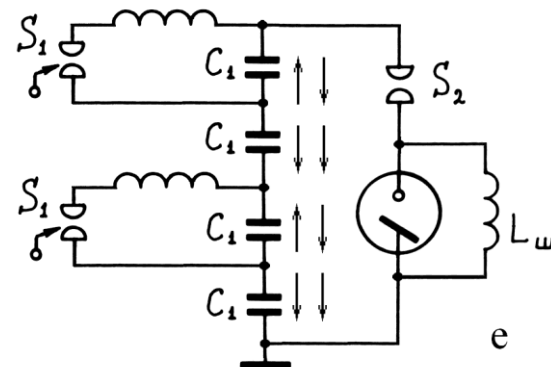


г

Формирующая линия

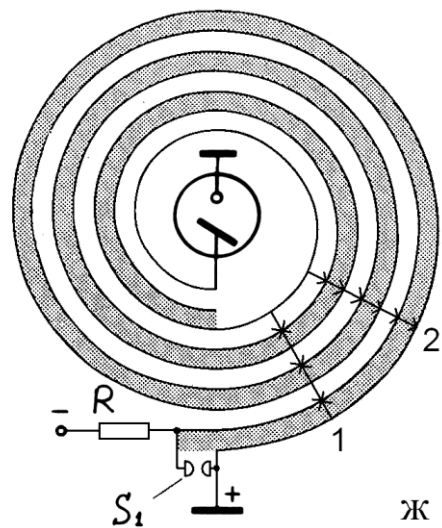


Генератор Аркадьева-Маркса



е

LC – генератор Фитча – Хауэлла

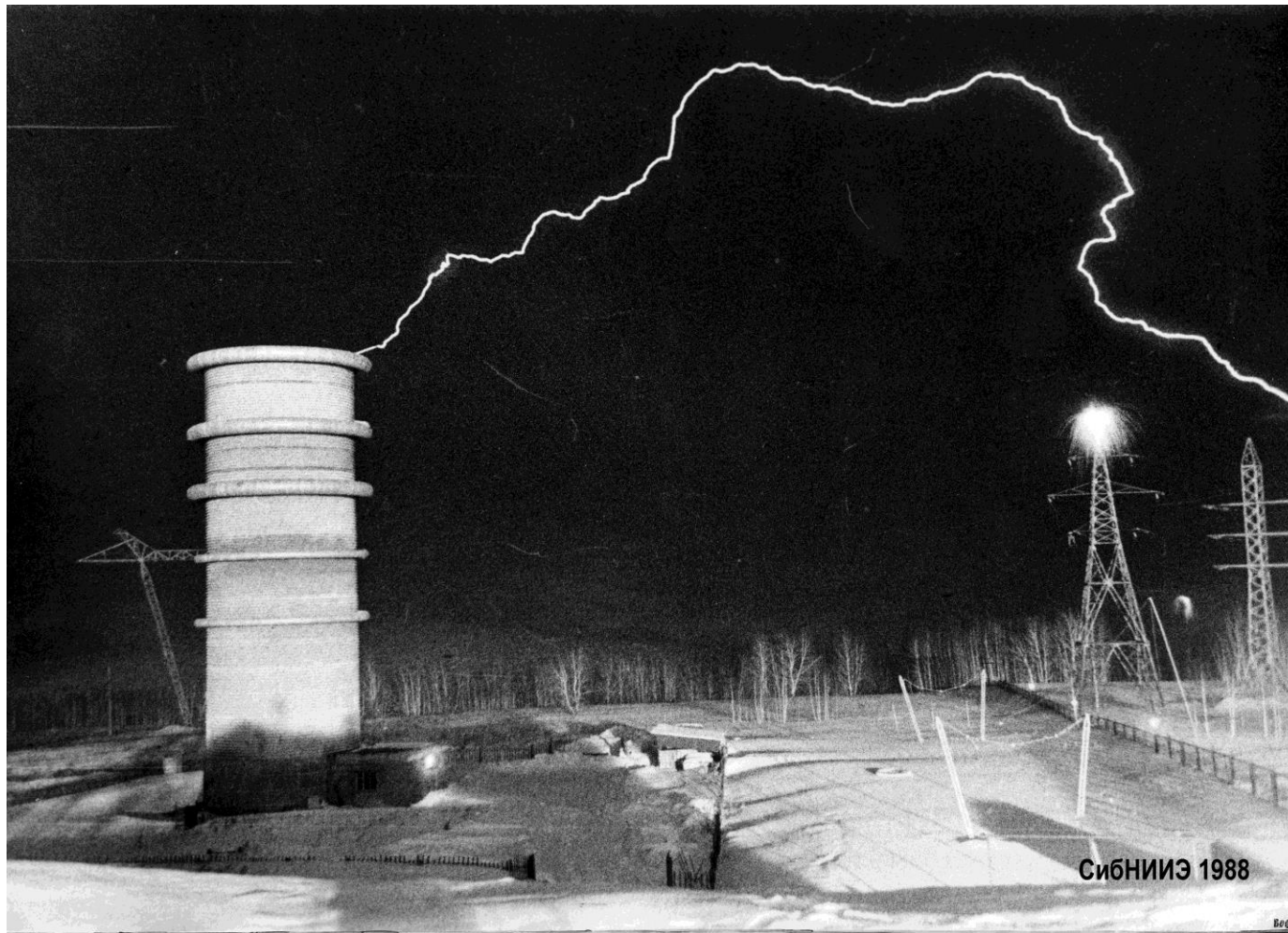


Спиральный генератор. Белкин – Жаркова

Установка ГОЛ-3. ИЯФ СО РАН

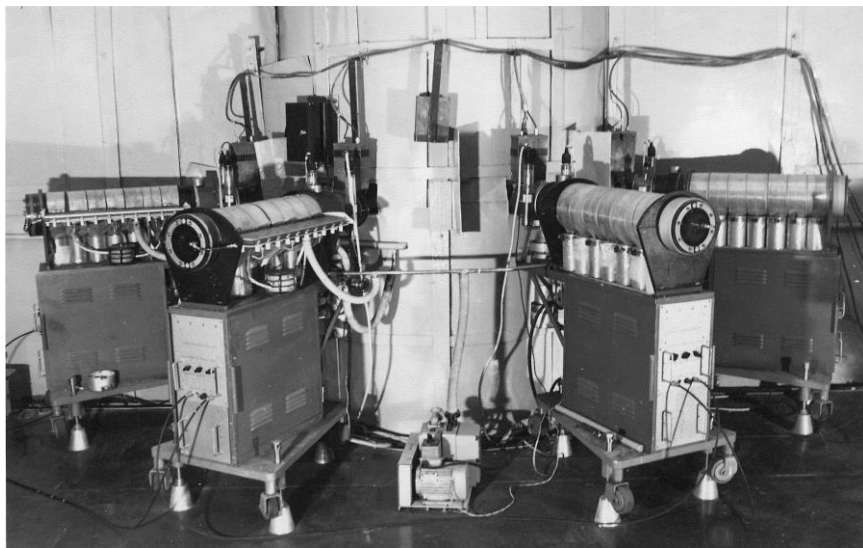


Генератор Аркадьева-Маркса



Разряд 5 МВ на линию электропередач. А. Гайворонский, А. Овсянников, Новосибирск

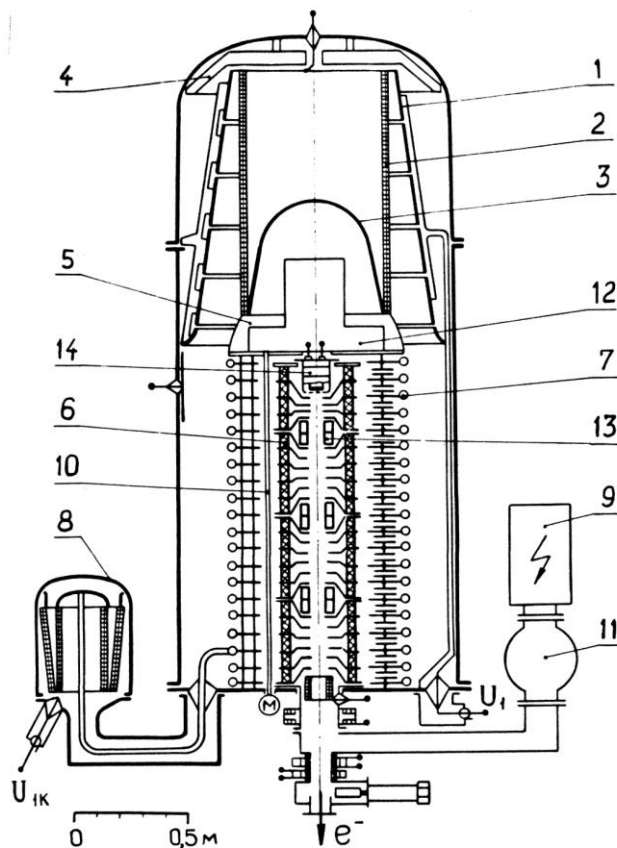
Ускорители – трансформаторы Тесла



ИГил – импульсные рентгеновские аппараты ПИР для съемки взрывных процессов

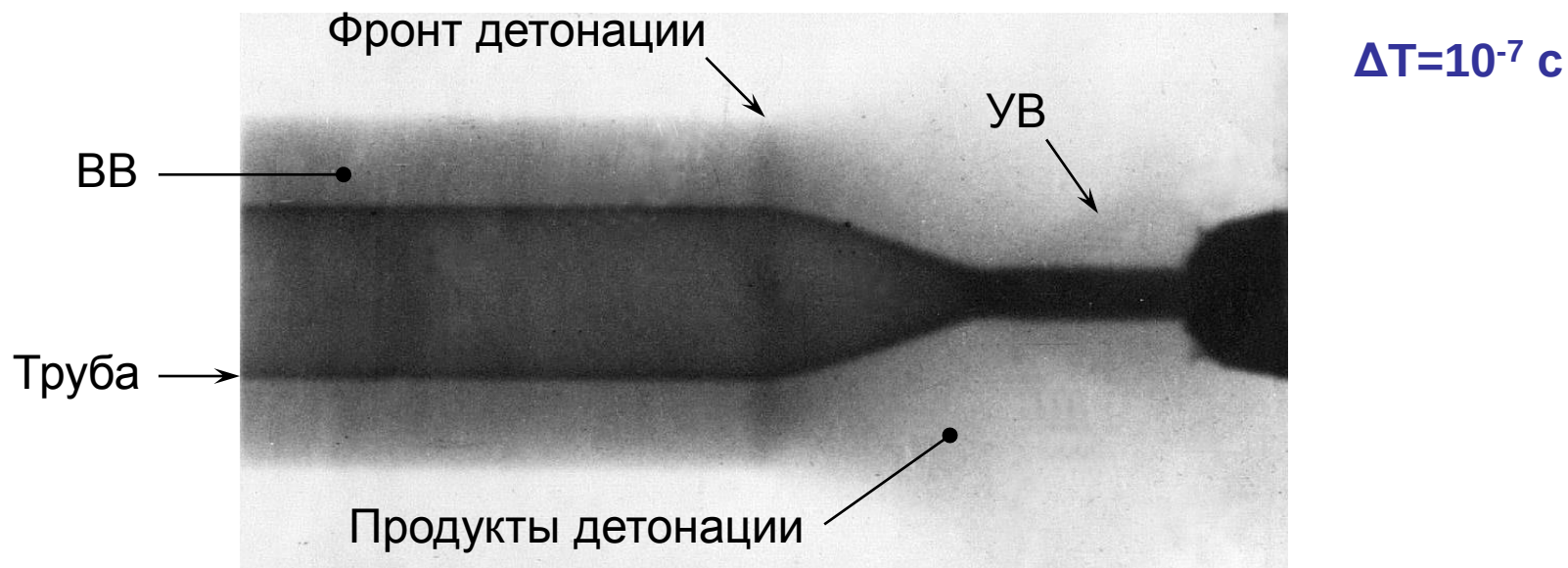


ИЯФ – Ускорители типа «Акваген», «РИУС», «Элит», «ЭЛВ» и др.



Ускоритель ЭЛИТ-3 – (часть инжектора позитронного пучка ВЭПП-4, ИЯФ).
1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка; 3 – защитный высоковольтный электрод (кондуктор); 4, 5 – магнитопроводы; 7 – высоковольтный емкостный накопитель (вторичная емкость); 9 – вакуумный насос; 14 – источник электронов (катод).

Рентгеновский снимок взрывного процесса с наблюдением ударных и детонационных волн



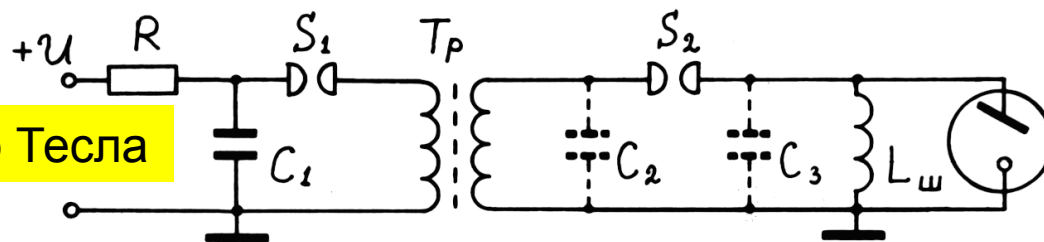
Снимок взрывного обжатия трубы до стержня, полученный аппаратом ПИР-600М
Напряжение на рентгеновской трубке 600 кВ, максимальная энергия квантов 600 кэВ

В эксперименте металлической труба с диаметром 35 мм и толщиной стенки 0,8 мм обжимается цилиндрическим зарядом взрывчатого вещества с внешним диаметром 70 мм.

Видны: труба, ВВ, фронт детонации, разлет продуктов детонации, ударная волна в продуктах детонации, сплошной стержень получающийся при схлопывании трубы.

Методы получения мощных коротких электрических импульсов. Схемы с промежуточным накоплением энергии.

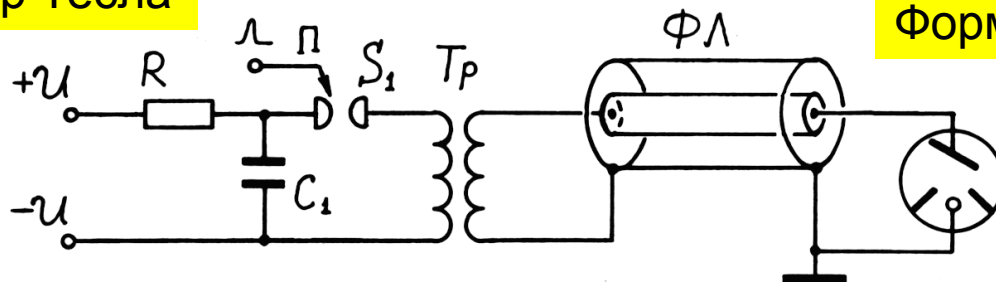
Трансформатор Тесла



Рентгеновская
(ускорительная)
Трубка с РО

Г

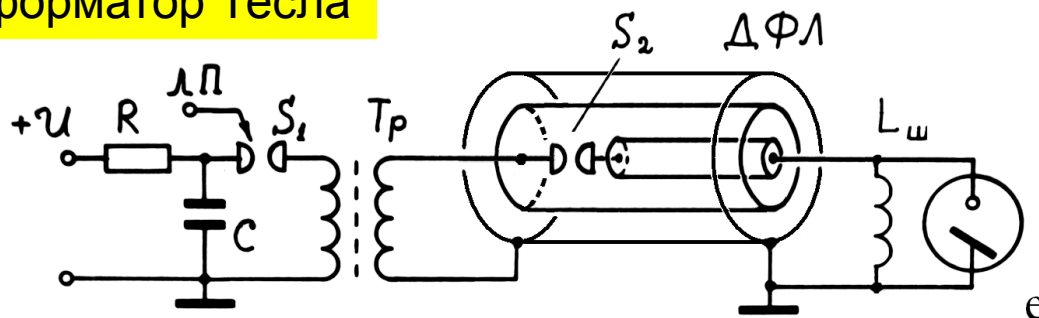
Трансформатор Тесла



Формирующая линия

Д

Трансформатор Тесла

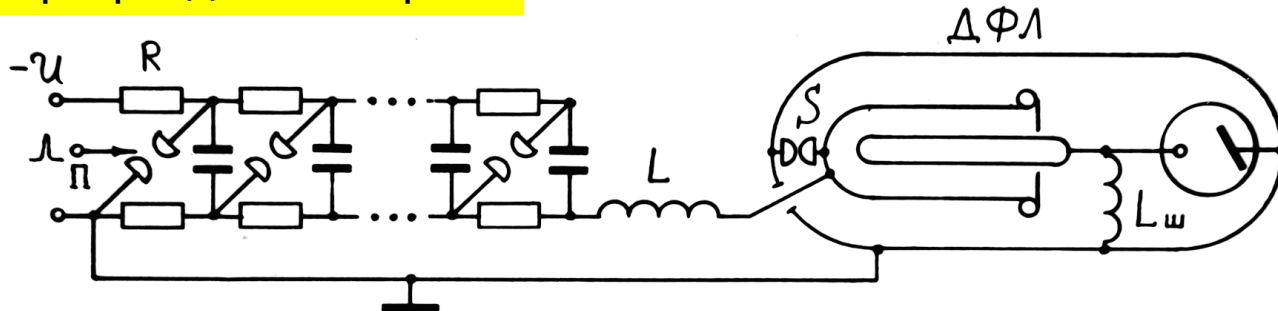


Двойная
формирующая
Линия с РО

е

Методы получения мощных коротких электрических импульсов. Схемы с промежуточным накоплением энергии.

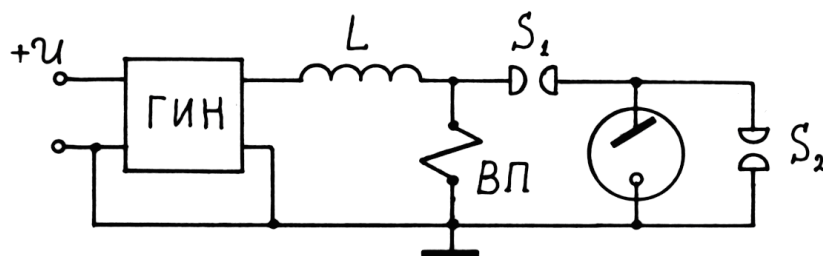
Генератор Аркадьева-Маркса



Двойная формирующая линия

а

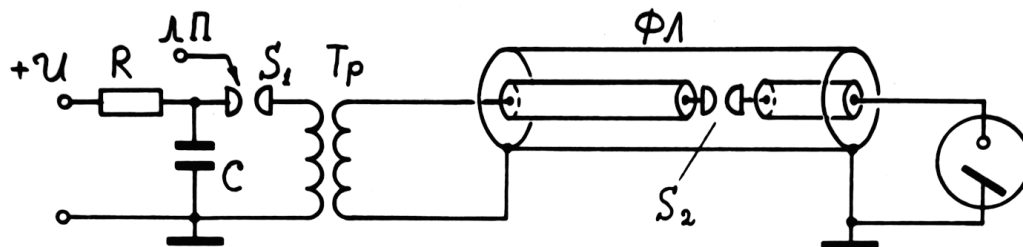
Генератор Аркадьева-Маркса



Индуктивный накопитель – взрывающаяся проволочка

б

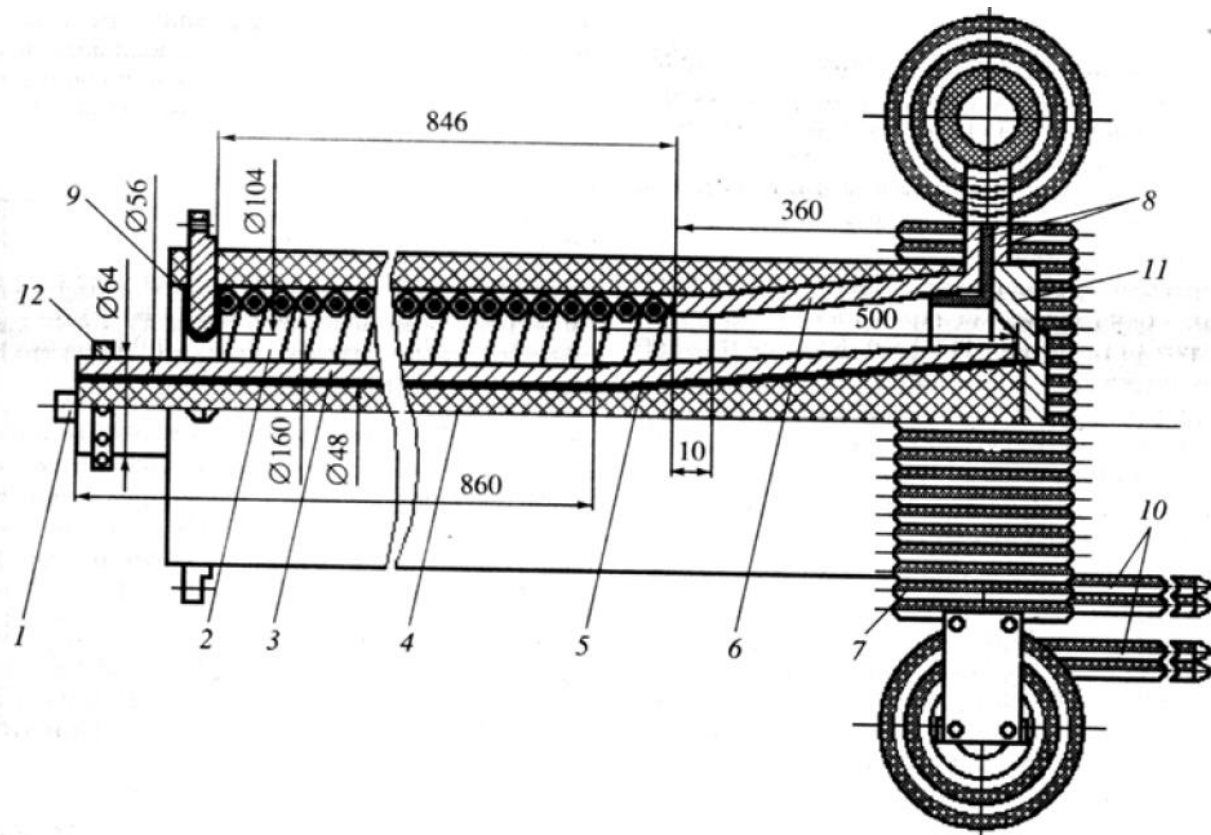
Трансформатор Тесла



Формирующая линия с разрядником - обострителем

в

Магнитно-кумулятивный генератор



Рекорды:

300 миллионов
ампер;

$B \approx 29$ МГс;

$3 \cdot 10^6$ Дж/см³

Внешний вид генератора: 1—детонатор; 2—соленоид; 3— арматура (металлическая труба); 4—взрывчатое вещество; 5—труба из оргстекла; 6—конусный коаксиальный участок; 7—трансформаторный узел; 8— выходные фланцы; 9—замыкатель; 10— выход трансформаторного узла; 11— конусный фланец; 12— крепежный хомут

Электромагнитные рельсотронные пушки и блоки питания для них –
взрывные магнитно-кумулятивные генераторы. ИГиЛ СО РАН.



Токи ~ 1 миллиона ампер. Энергия электрического импульса – до
10 МДж. Скорости – до 7 км/с

Профили композитных стволов разных калибров и
кратер в дюралюминии от попадания пластмассовой
пульки из ствола малого калибра (ствол справа внизу)



Примеры сложных импульсных машин

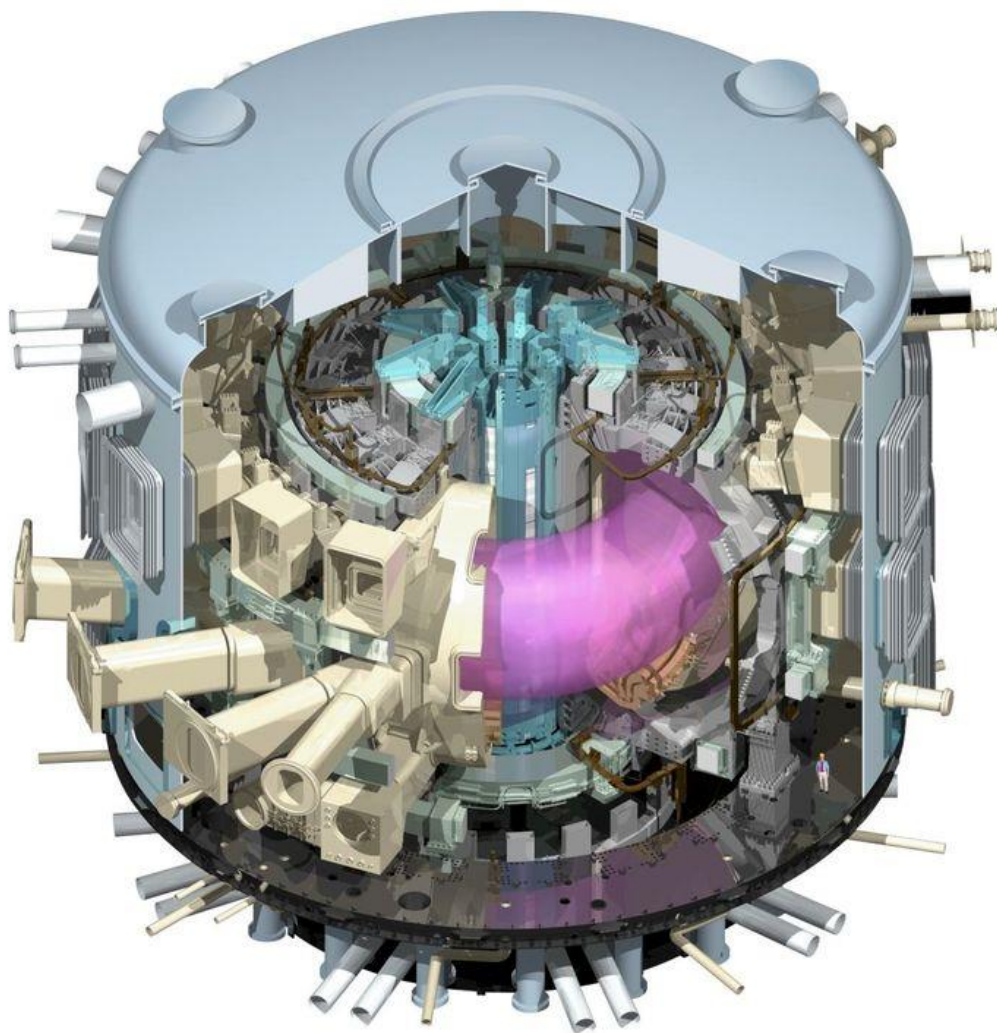
- Ангара
- Аврора
- РИУС, АКВАГЕН
- ЛИУ-30
- ИГУР-2
- ВМГ (ВМГ-320), МАГО (МАГнитное Обжатие)
- ИСКРА-5
- СВЧ. Гексатрон, генераторы с виртуальным катодом

Ангара – 5. Генератор А – М + ДФЛ. ГНЦ РФ ТРИНИТИ



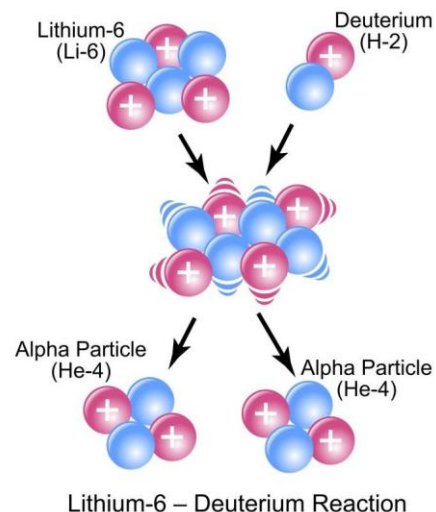
4 миллиона ампер, 500 км/с для ксенонового лайнера, полученное рентгеновское излучение 100 эВ создавало плоские ударные волны давлением 5 мегабар и разгоняло металлические ударники до 10-12 км/с

Сверхмощный термоядерный комплекс «Байкал»



Реализация – до конца 2020 года

<http://www.sciencedebate2008.com/thermonuclear-complex-baikal/>



В составе комплекса 24 модуля, имеющих суммарную электрическую мощность, превышающую $3 \cdot 10^{14}$ Вт

Электрическая энергия 4 ГДж накапливается в индуктивных накопителях с последующим обострением мощности для питания быстрой лайнерной системы мощностью 500-1000 ТВт

Схема установки «Байкал»



Схема установки «Байкал»

Приборы для измерения импульсных токов и напряжений

- Резистивные делители напряжения
- Емкостные делители напряжения
- Компенсированные делители напряжения
- Токовые шунты
- Компенсированные токовые шунты
- Пояс Роговского
- Электрооптические ячейки (могут служить коммутаторами для света)

Изоляционные материалы

- Трансформаторное (конденсаторное) масло
- Касторовое (рициновое) масло
- Перфтораны, Перфтордибутиловый эфир
- Вода
- Элегаз
- Вакуум
- Конденсаторная бумага
- Лавсан
- Фторопласт
- Полипропилен
- Винипласт
- Полиимид

Спасибо за внимание!

Вопросы есть?

