



З Д Р А В С Т В У Й Т Е !

Лекция 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

- **12.1. Явление ионизации и рекомбинации в газах;**
- **12.2. Несамостоятельный газовый разряд;**
- **12.3. Самостоятельный газовый разряд;**
- **12.4. Типы разрядов;**
- **12.5. Применение газового разряда;**
- **12.6. Понятие о плазме**

Основные обозначения

- N_0 – число молекул газа в единице V
- N – число ионов одного знака; $N/V = n$ – концентрация ионов
- Δn_i – число пар ионов возникающих под действием ионизатора за 1 сек в единице V
- Δn_r – число пар ионов рекомбинирующих за 1 сек в единице объема
- Δn_j – число пар ионов уходящих из газоразрядного промежутка к электродам за 1 сек
- \vec{v}^+ и \vec{v}^- – скорости направленного движения положительных и отрицательных ионов
- μ – подвижность ионов
- q – заряд, переносимый ионами
- \vec{j} – плотность тока
- \vec{E} – напряженность электрического поля
- d – расстояние между электродами

Основные соотношения

- $\Delta n_i = \Delta n_r$ – условие равновесия возникающих и рекомбинирующих ионов без поля.
- $\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j$ – условие равновесия ионов в электрическом поле.
- 1) Случай слабого поля $\Delta n_j \ll \Delta n_r$
- $\vec{j} = nq(\vec{v}^+ + \vec{v}^-)$ плотность тока в цепи
- $\vec{v}^+ = \mu_+ \vec{E}$ и $\vec{v}^- = \mu_- \vec{E}$
- Обозначим $nq(\mu_+ + \mu_-) = \sigma$ – удельная проводимость тогда
- $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ Закон Ома в дифференциальной форме
- 2) Случай сильного поля
- $\Delta n_r \ll \Delta n_j$ и $\Delta n_i = \Delta n_j$ ($\Delta n_r \rightarrow 0$)
- Δn_i – не зависит от E
- I_n – ток насыщения
- $j_n = Nqd$ – плотность тока насыщения

12.1. Явление ионизации и рекомбинации в газах

- *Процесс ионизации* заключается в том, что *под действием высокой температуры или некоторых лучей молекулы газа теряют электроны и тем самым превращаются в положительные ионы.*
- *Ионизация газа может происходить под действием коротковолнового излучения – ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма – лучей, а также альфа, бета – и космических лучей.*
- *Одновременно с процессом ионизации идёт обратный процесс **рекомбинации** (иначе - **молизации**).*
- *Рекомбинация – это нейтрализация при встрече разноименных ионов или воссоединение иона и электрона в нейтральную молекулу (атом).*
- *Факторы, под действием которых возникает ионизация в газе, называют **внешними ионизаторами**, а возникающая при этом проводимость называется **несамостоятельной проводимостью**.*

1. Слабое поле

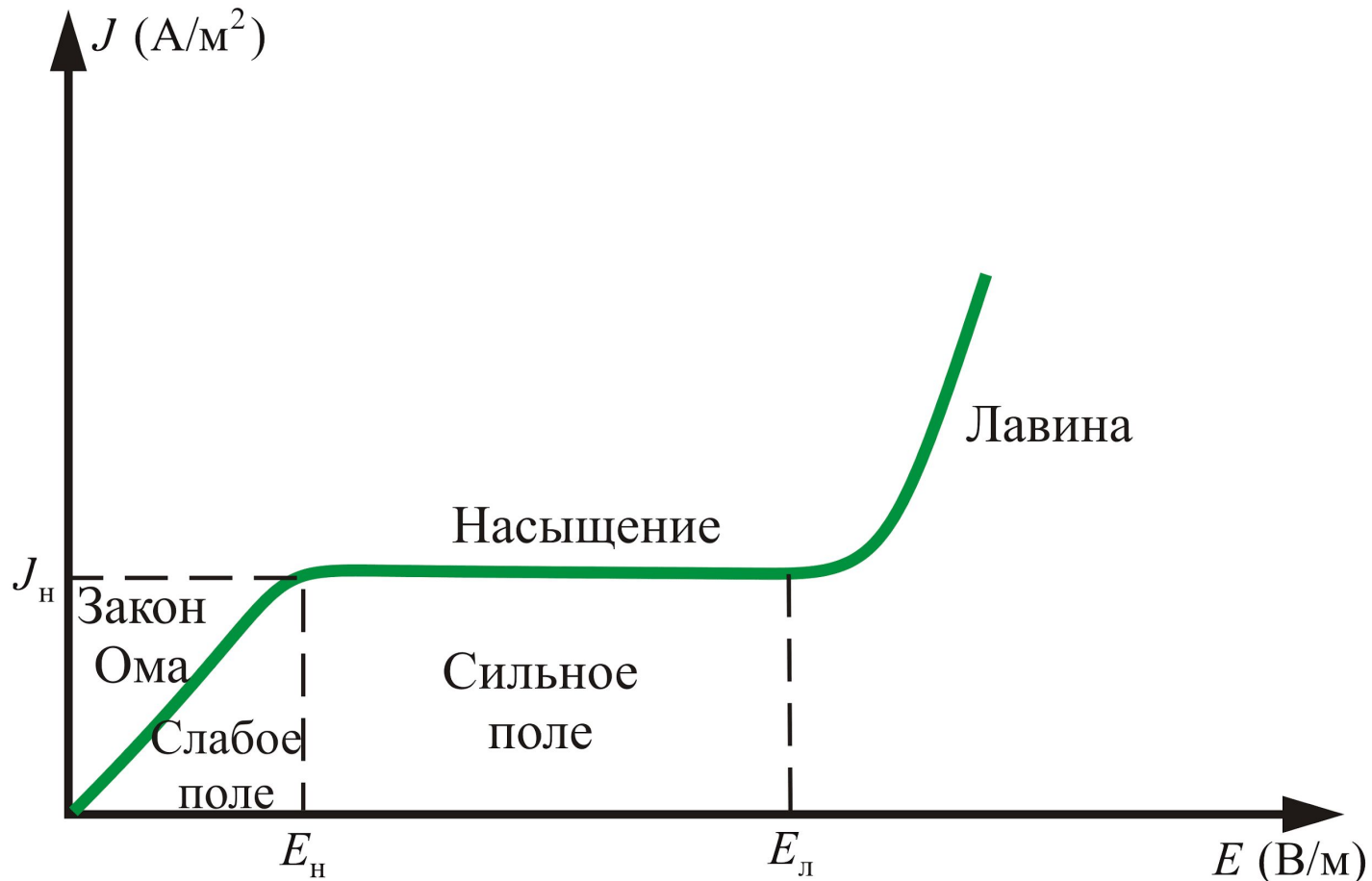
$$n_j \ll n_r$$

$$\begin{aligned} \mathbf{j} &= nq(\mathbf{v}^+ + \mathbf{v}^-) \\ \mathbf{v}^+ &= \mu_+ \mathbf{E}, \quad \mathbf{v}^- = \mu_- \mathbf{E}, \\ \mathbf{j} &= nq(\mu_+ + \mu_-) \mathbf{E} \\ \mathbf{j} &= q \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} (\mu_+ + \mu_-) \mathbf{E} \end{aligned}$$

$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ – закон Ома в диф. форме.

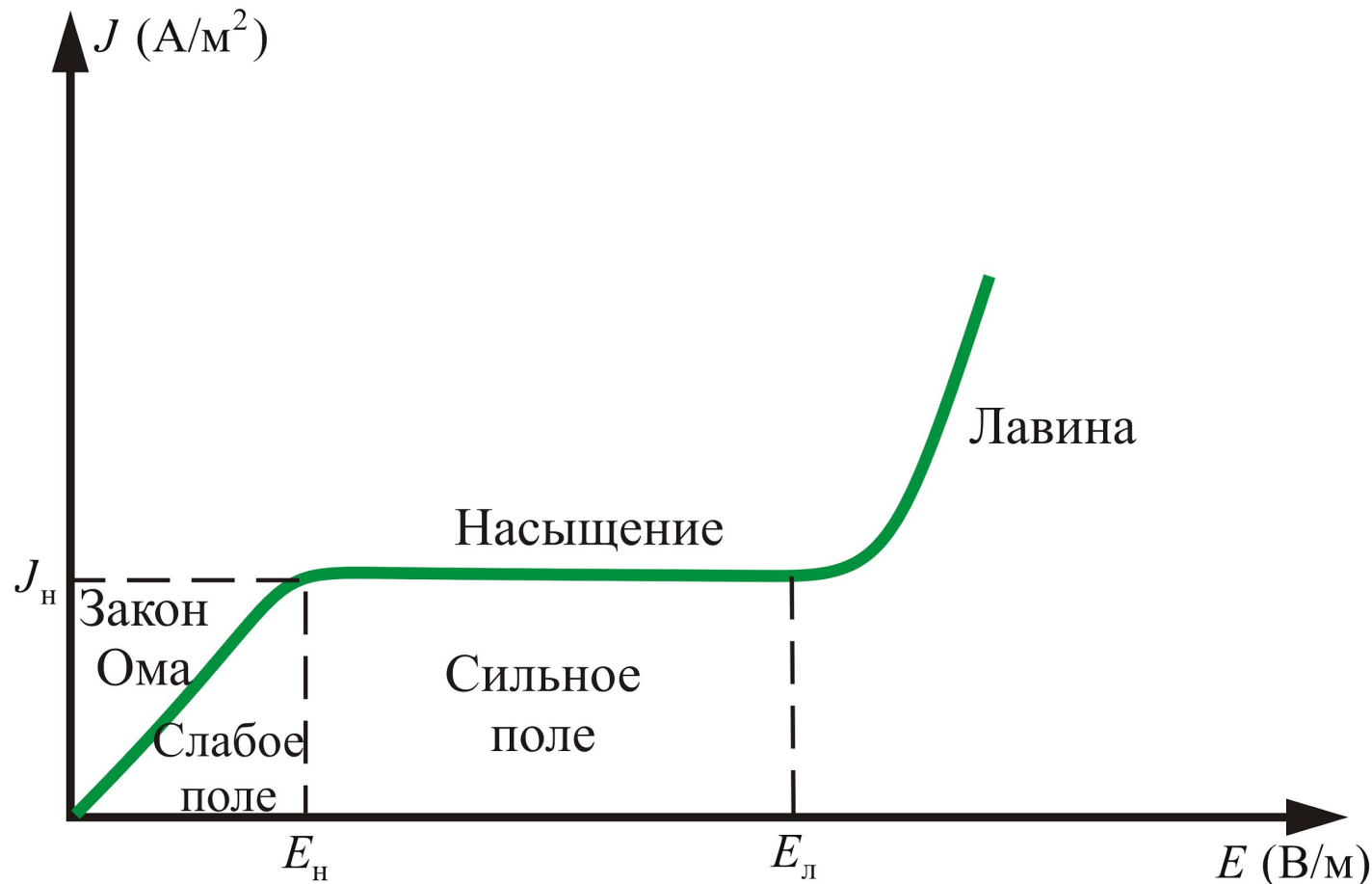
$\vec{j} = \sigma \vec{E}$ – закон Ома в диф. форме.

Вывод: в случае слабых электрических полей ток при несамостоятельном разряде подчиняется закону Ома.

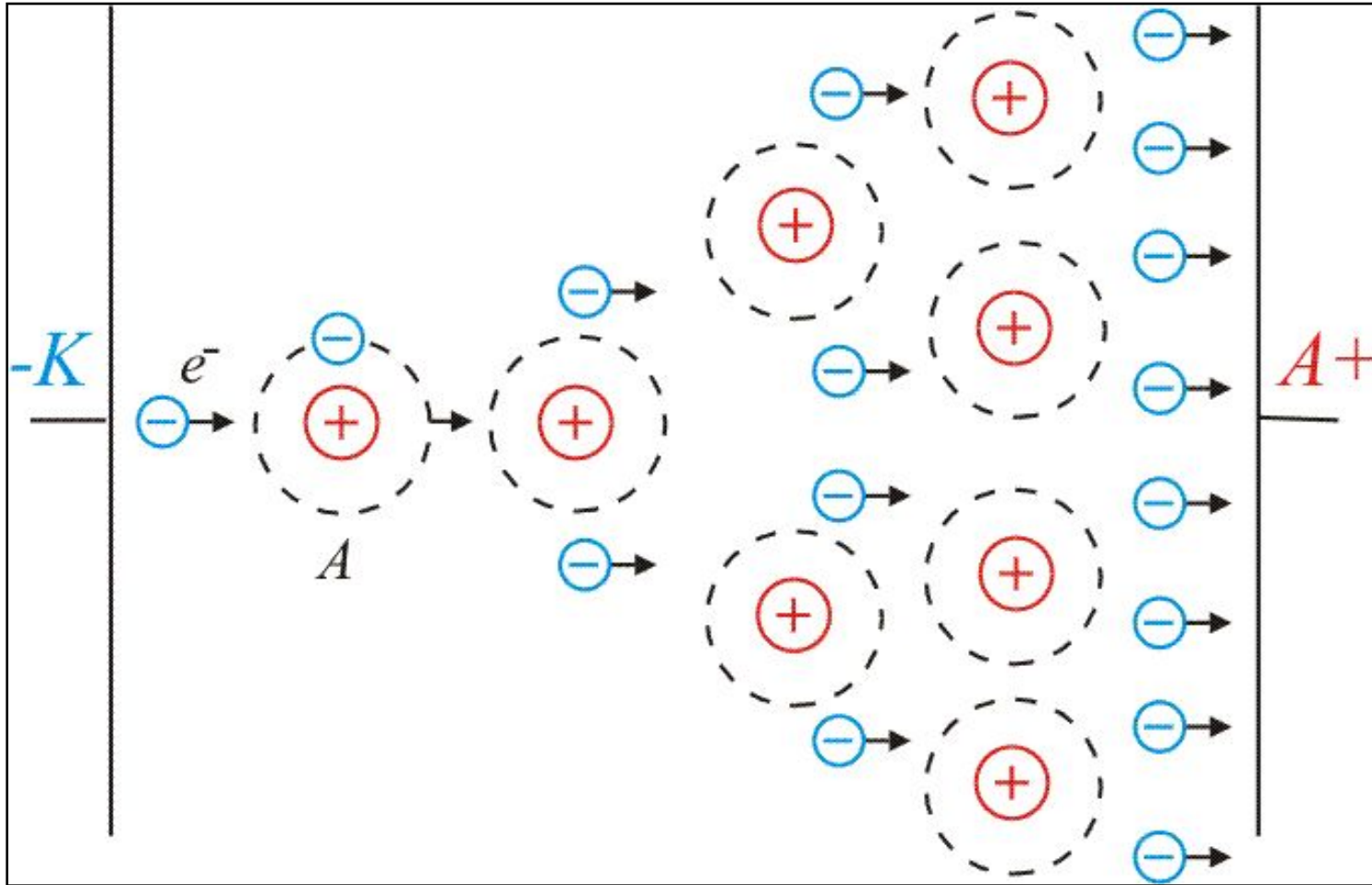


Сильное поле $\Delta n_r \ll \Delta n_j$ и $\Delta n_i = \Delta n_j$ ($\Delta n_r \rightarrow 0$)

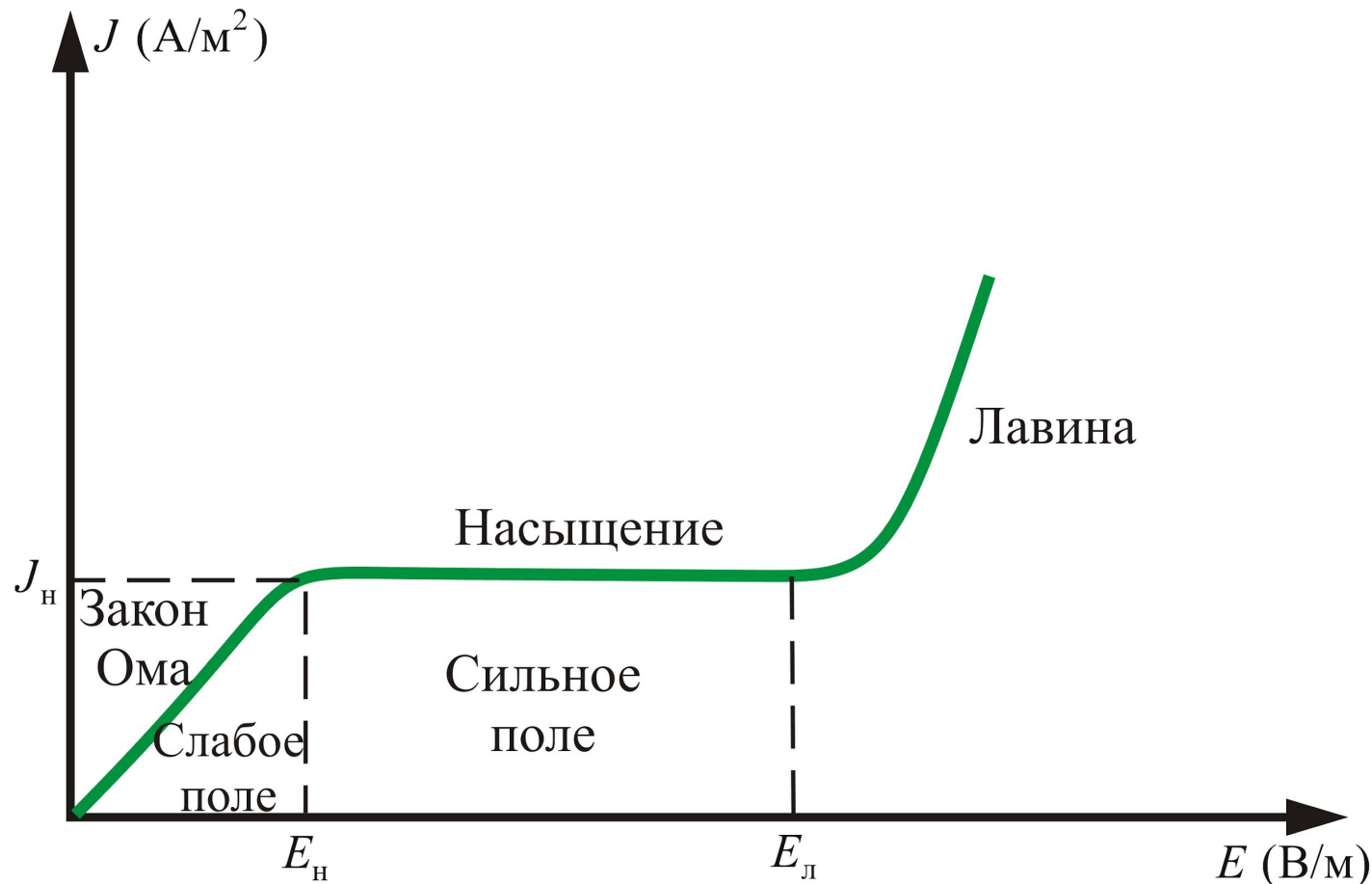
Максимальное значение тока, при котором все образующиеся ионы уходят к электродам, носит название **тока насыщения**.



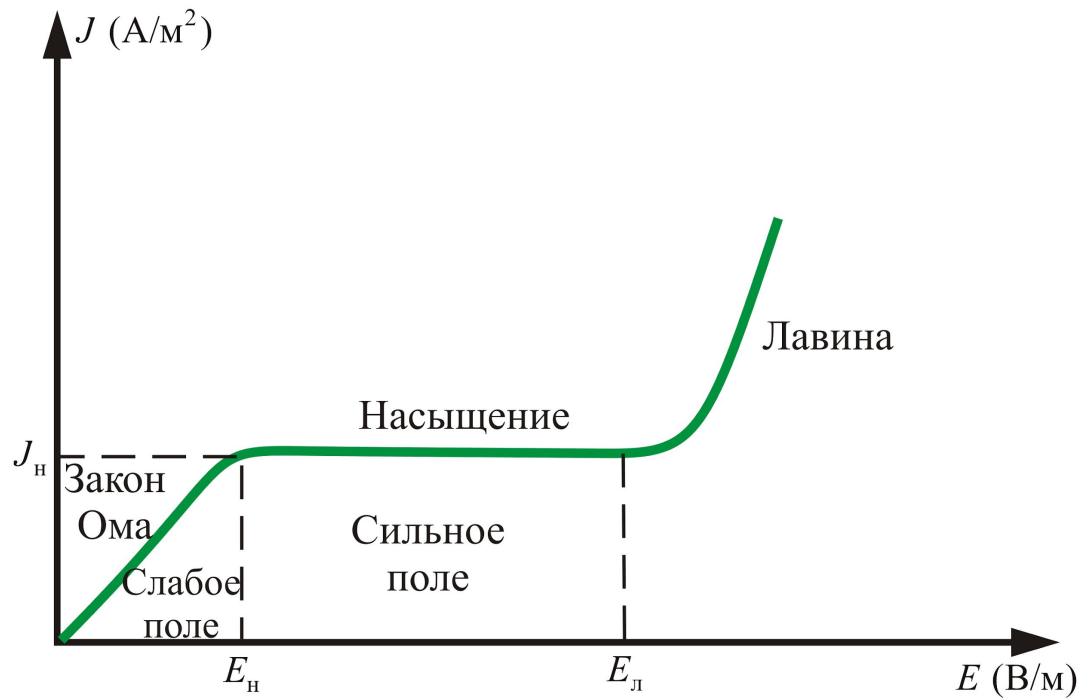
Дальнейшее увеличение напряженности поля ведет к образованию **лавины** электронов



Происходит **лавинообразное размножение первичных ионов и электронов**, созданных внешним ионизатором и **усиление разрядного тока.**



Вывод: для несамостоятельного разряда **при малых плотностях тока**, т.е. когда основную роль в исчезновении зарядов из газоразрядного промежутка играет процесс рекомбинации ($j = \sigma E$), **при больших полях** закон Ома не выполняется – наступает явление **насыщения**, а **при полях превышающих $E_{\text{Л}}$** – возникает **лавиная** зарядов, обуславливающая значительное увеличение плотности тока.



12.2. Несамостоятельный газовый разряд

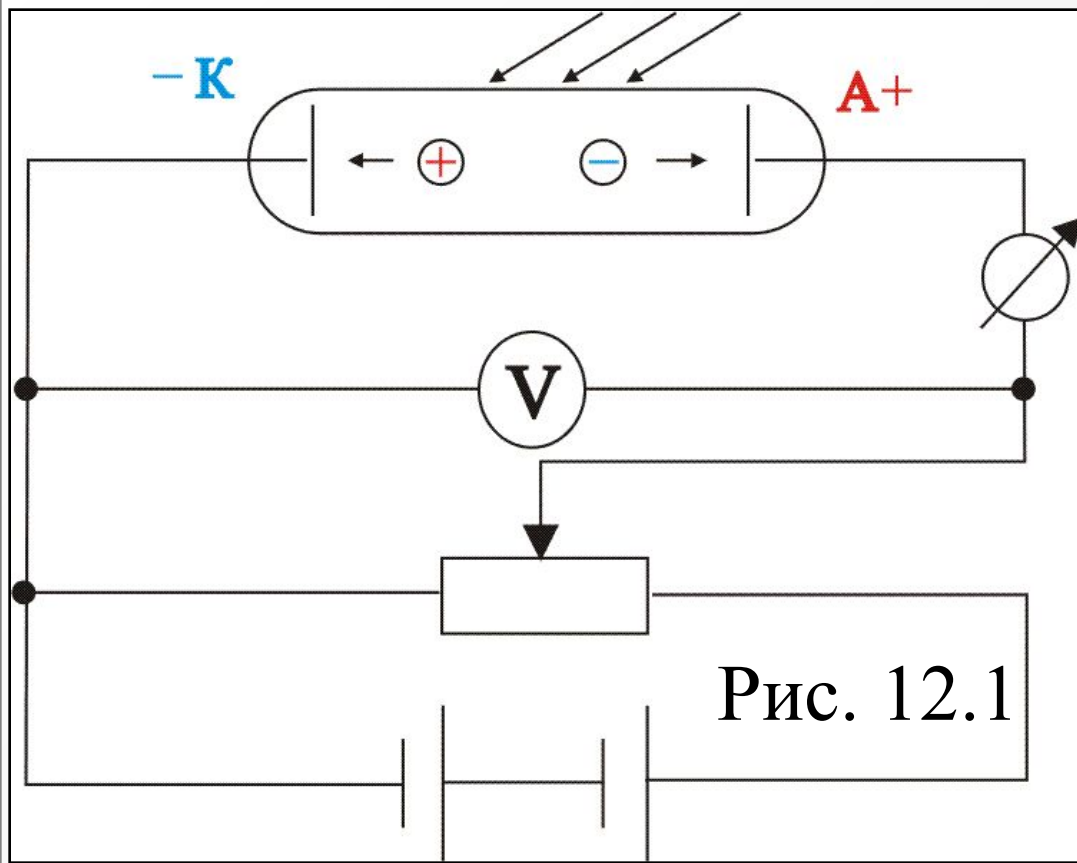
Несамостоятельным газовым разрядом называется такой разряд, который, возникнув при наличии электрического поля, может существовать только под действием внешнего ионизатора.

Пусть между двумя пластинами конденсатора (рис. 12.1) создано электрическое поле напряженностью E , а в промежутке между пластинами внешним ионизатором в единице объема в единицу времени создается q пар ионов и поддерживается концентрация ионов n^+ и n^- обоих знаков. Плотность электрического тока между пластинами при равномерной по объему ионизации равна

$$j = en_+v_+ + en_-v_-$$

ИЛИ

$$\vec{j} = en(\vec{v}_+ + \vec{v}_-)$$



Количество рекомбинирующих за секунду в единице объема пар ионов пропорционально квадрату числа имеющихся в объеме пар ионов n :

$$\Delta n_r = rn^2 \quad (12.2.1)$$

(r – коэффициент пропорциональности)

В состоянии равновесия Δn_i д.б. равно Δn_r , т.е.

$$\Delta n_i = rn^2 \quad (12.2.2)$$

Отсюда для равновесной концентрации ионов получается следующее выражение

(12.2.3)

$$n = \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}}$$

Если подать напряжение на электроды, то убыль ионов будет происходить не только вследствие рекомбинации, но и за счет вытягивания ионов полем к электродам. Пусть из единицы объема вытягивается каждую секунду Δn_j пар ионов. Если заряд каждого иона q , то нейтрализация на электродах одной пары ионы сопровождается переносом по цепи заряда, равного q . Каждую секунду электродов достигает $\Delta n_j Sl$ пар ионов (S – электродов; l – расстояние между ними; Sl – равно объему межэлектродного пространства). Следовательно, сила тока в цепи равна:

$$I = q\Delta n_j Sl;$$

отсюда

$$\Delta n_j = I / qSl = j/ql, \quad (12.2.4)$$

где j – плотность тока.

При наличии тока условие равновесия д.б. записано следующим образом:

$$\Delta n_i = \Delta n_r + \Delta n_j$$

Подставив сюда выражения (12.2.1) и (12.2.4), получим соотношение

$$\Delta n_i = rn^2 + j/ql \quad (12.2.5)$$

Вместе с тем для плотности тока м.б. Записано выражение

$$\vec{j} = nq(\vec{v}^+ + \vec{v}^-) \quad \text{т.к.}$$

$$\vec{v}^+ = \mu_+ \vec{E}, \quad \vec{v}^- = \mu_- \vec{E}, \text{ то}$$

$$\vec{j} = nq(\mu_+ + \mu_-) \vec{E}, \quad (12.2.6)$$

В этом выражении n является, как это следует из соотношения (12.2.5), функцией j , т.е. в конечном счете функцией E .

Исключив n из выражений (12.2.5) и (12.2.6) и решив получающееся квадратное уравнение, можно найти для j следующую формулу:

$$j = \frac{q(\mu_+ + \mu_-)^2}{2rl} E^2 \left(\sqrt{1 + \frac{4\Delta n_i rl^2}{(\mu_+ + \mu_-)^2 E^2}} - 1 \right) \quad (12.2.7)$$

Рассмотрим случаи слабых и сильных полей.

1. Слабое поле $n_j \ll n_r$.

В случае слабых полей плотность тока будет очень мала и слагаемым j/ql в соотношении (12.2.5) можно пренебречь по сравнению с rn^2 (это означает, что убыль ионов из межэлектродного пространства происходит в основном за счет рекомбинации). Тогда (12.2.5) переходит в (12.2.2) и для равновесной концентрации ионов получается выражение (12.2.3). Подставляя это значение n в (12.2.6), получаем

$$j = q \sqrt{\frac{\Delta n_i}{r}} (\mu_+ + \mu_-) E \quad (12.2.8)$$

(эта формула получается из (12.2.7), если пренебречь единицей под корнем). Множитель при E в (12.2.8) не зависит от напряженности поля. Следовательно, в случае слабых полей несамостоятельный газовый разряд подчиняется закону Ома.

$\vec{j} = \sigma \vec{E}$ – закон Ома в диф. форме.

2. В случае сильных полей слагаемым rn^2 в формуле (12.2.5) можно пренебречь по сравнению с j/ql . Это означает, что практически все возникающие ионы достигают электродов, не успев рекомбинировать. При этом условии соотношение (12.2.5) принимает вид

$$\Delta n_i = j/ql,$$
$$j = q \Delta n_i \cdot l \quad (12.2.12)$$

откуда

Плотность тока (12.2.12) создается всеми ионами, порождаемыми ионизатором в заключенном между электродами столбе газа с единичным поперечным сечением. Следовательно, эта плотность является наибольшей при данной интенсивности ионизатора и величине межэлектродного промежутка l . Ее называют плотностью тока насыщения $j_{\text{насыщ.}}$. График функции (12.2.7) изображен на рис 12.2.

При достаточно больших значениях напряженности поля ток начинает резко возрастать. Это объясняется тем, что порождаемые внешним ионизатором электроны за время свободного пробега успевают приобрести энергию, достаточную для того, чтобы, столкнувшись с молекулой, вызвать ее ионизацию (ионизация ударом). Возникшие при этом свободные электроны, разогнавшись, в свою очередь вызывают ионизацию. Т.о., происходит лавинообразное размножение первичных ионов, созданных внешним ионизатором, и усиление разрядного тока.

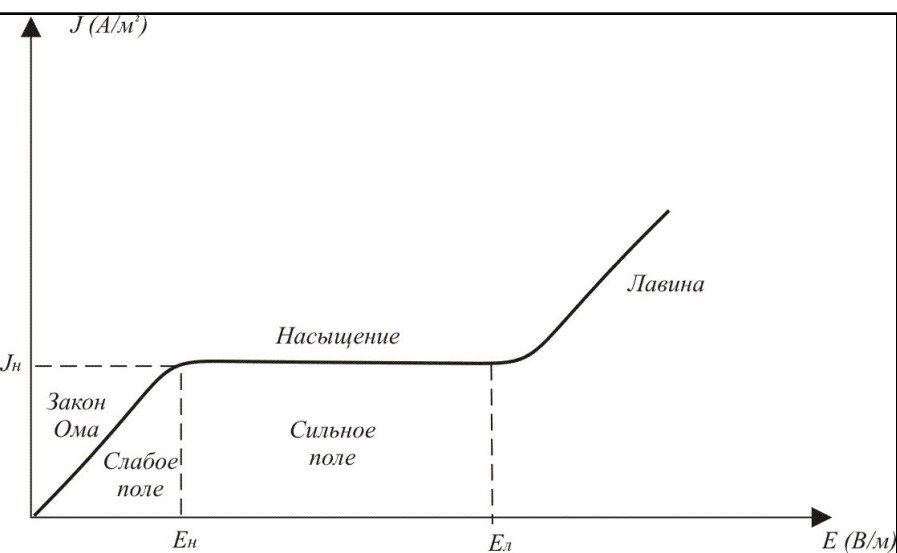


Рис. 12.2

Однако процесс не утрачивает характера несамостоятельного разряда, т.к. после прекращения действия внешнего ионизатора разряд быстро затухает. Для того чтобы разряд был самостоятельным, необходимо наличие двух встречных лавин ионов, когда ионизацию ударом

способны вызвать носители обоих знаков.

Весьма важно, что несамостоятельные разрядные токи, усиленные за счет размножения носителей, пропорциональны числу первичных ионов, создаваемых внешним ионизатором. Это свойство разряда используется в пропорциональных счетчиках (ионизационные камеры и счетчики).

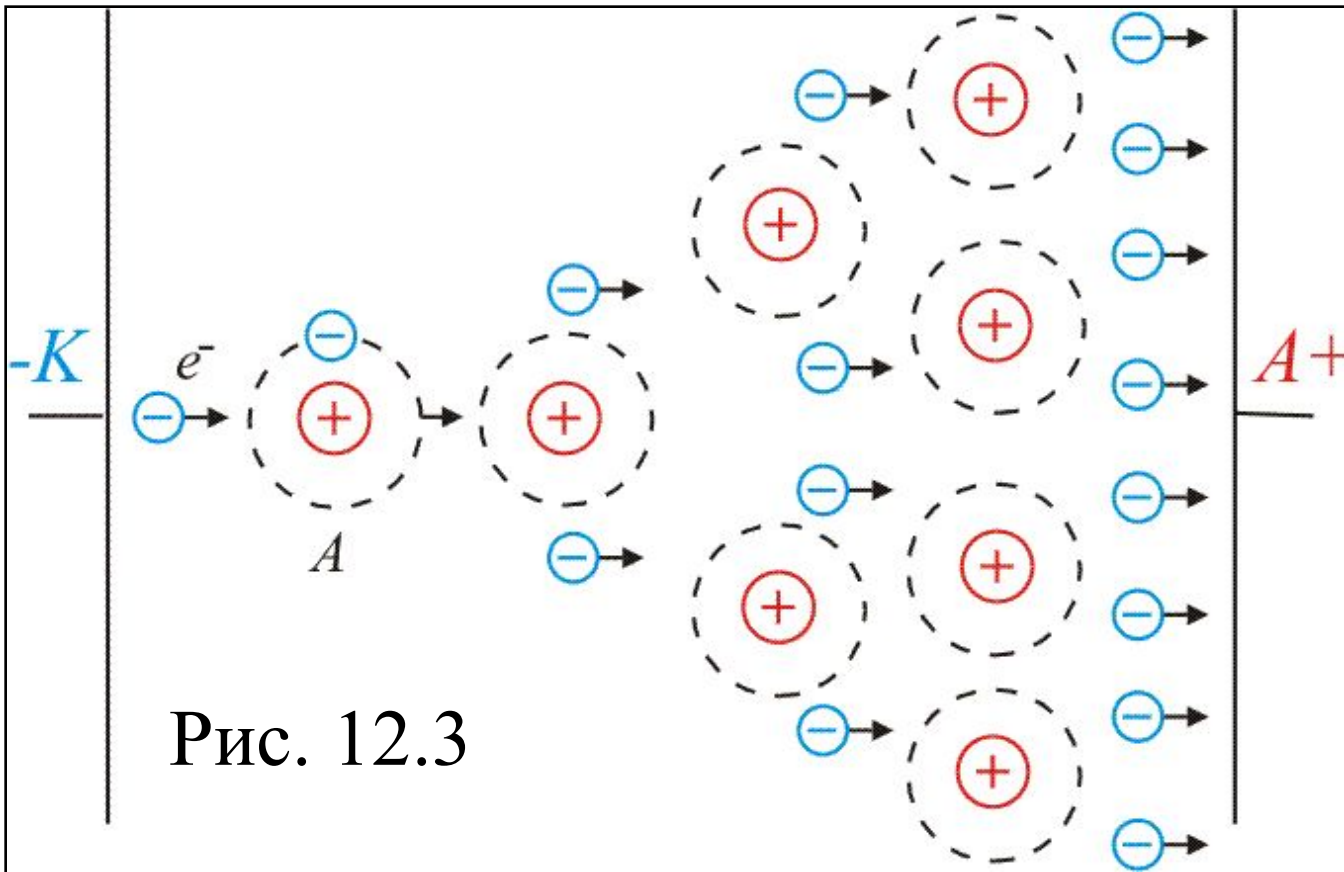


Рис. 12.3

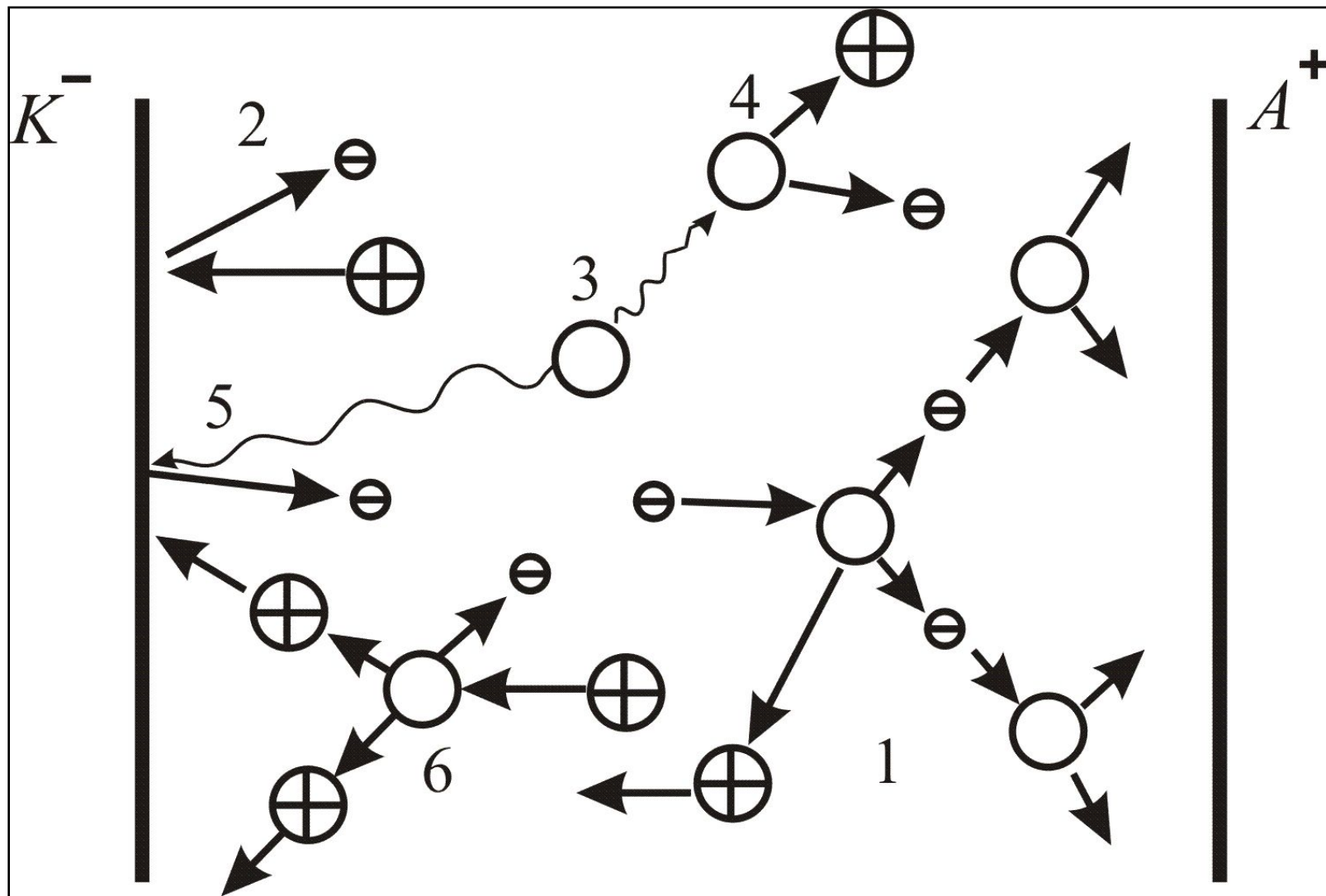
12.3. Самостоятельный газовый разряд

Самостоятельный разряд такой газовый разряд, в котором носители тока возникают в результате тех процессов в газе, которые обусловлены приложенным к газу напряжением.

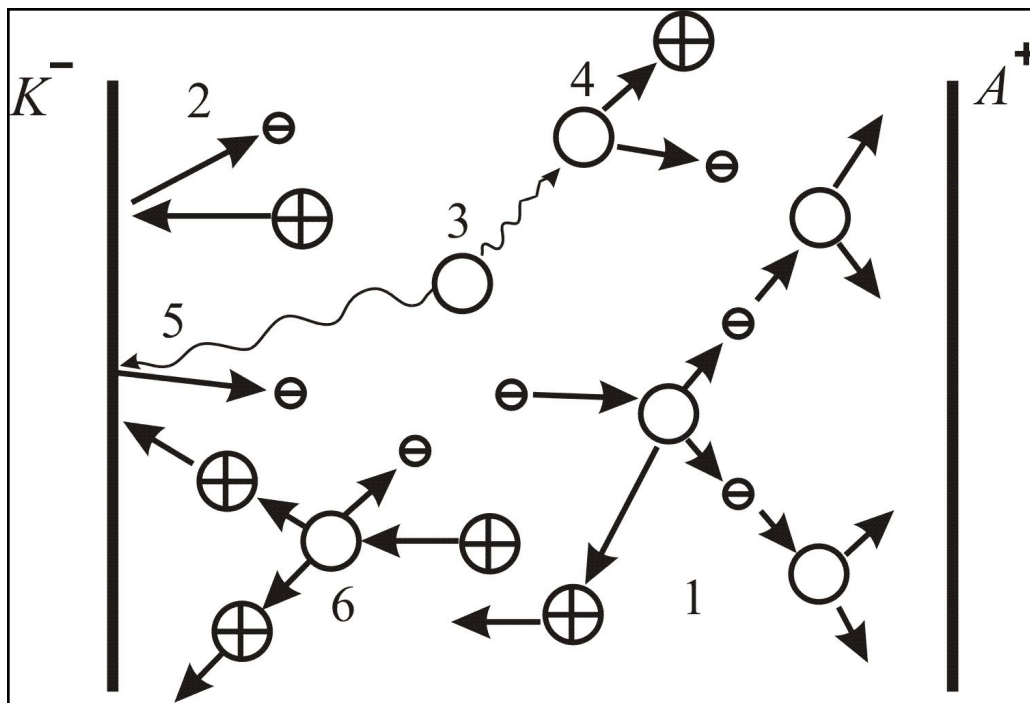
Т. е. данный разряд продолжается и после прекращения действия ионизатора.

Когда межэлектродный промежуток перекрывается полностью проводящей газоразрядной плазмой, наступает его **пробой**.
Напряжение, при котором происходит пробой межэлектродного промежутка, называется **пробивным напряжением**.

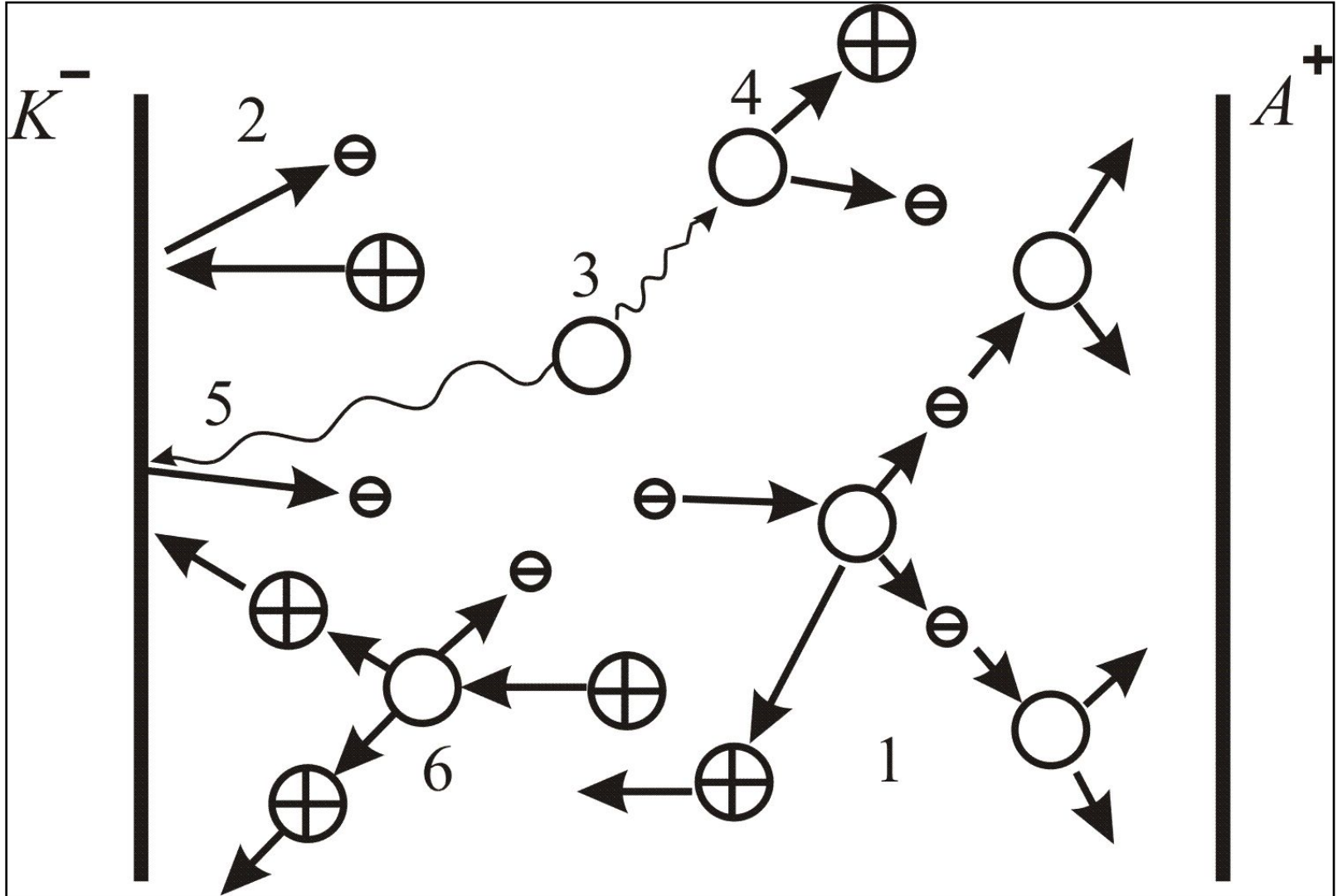
8.3. Самостоятельный газовый



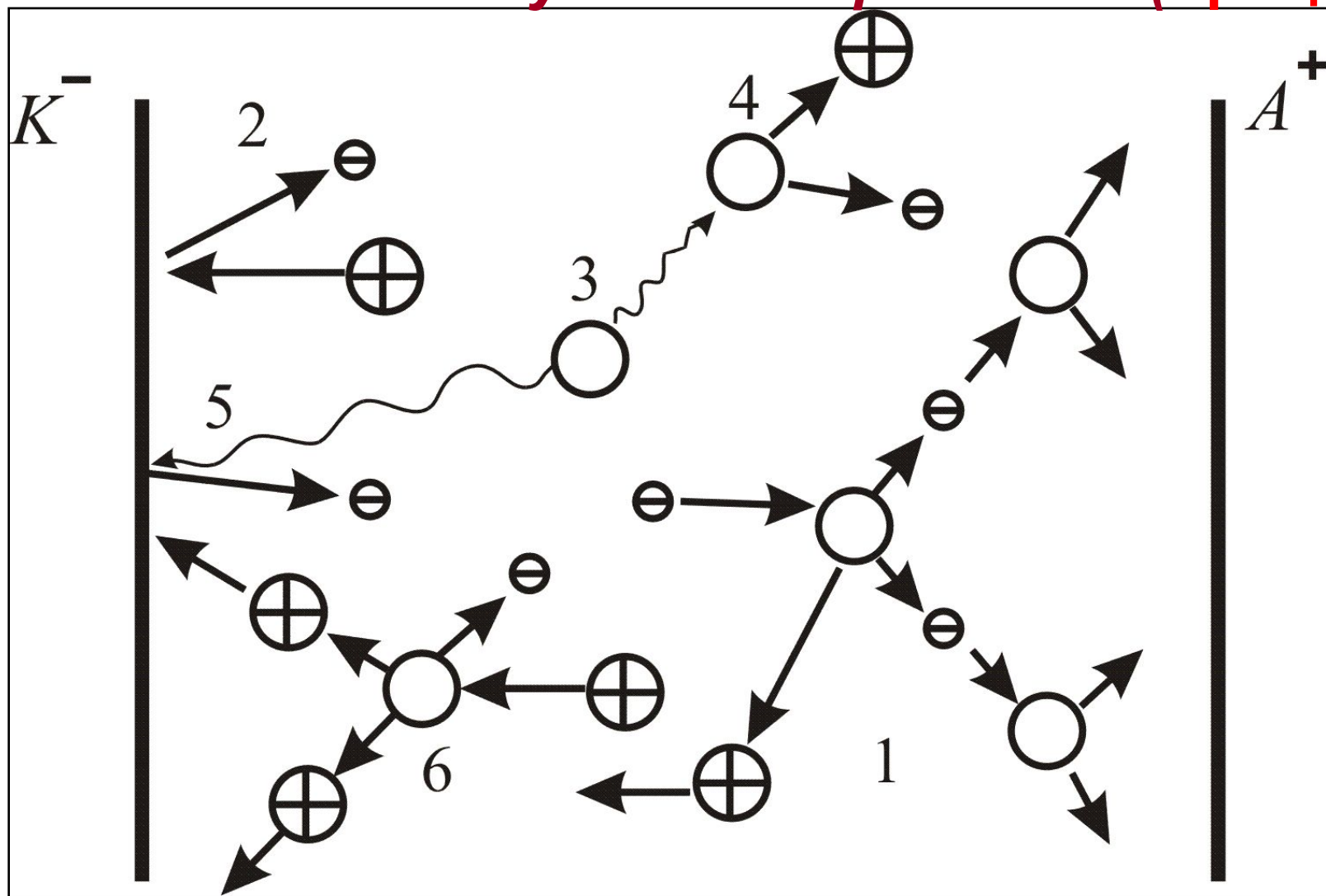
- При больших напряжениях между электродами газового промежутка **ток сильно возрастает**. Это происходит вследствие того, что возникающие под действием внешнего ионизатора **электроны, сильно ускоренные электрическим полем, сталкиваются с нейтральными молекулами газа и ионизируют их**. В результате этого образуются **вторичные электроны и положительные ионы** (**процесс 1**)



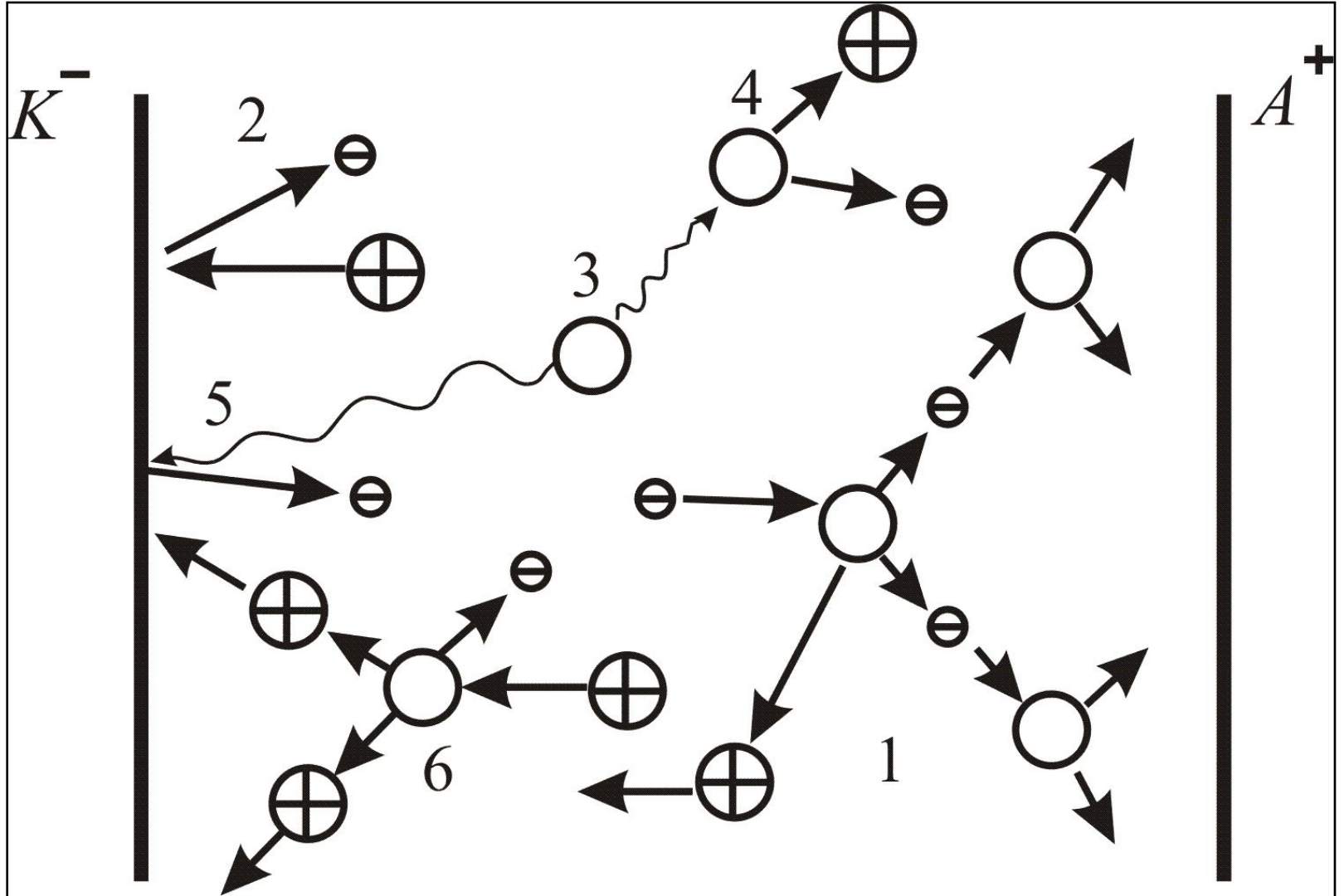
Ускоренные электрическим полем **положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны (процесс 2);**



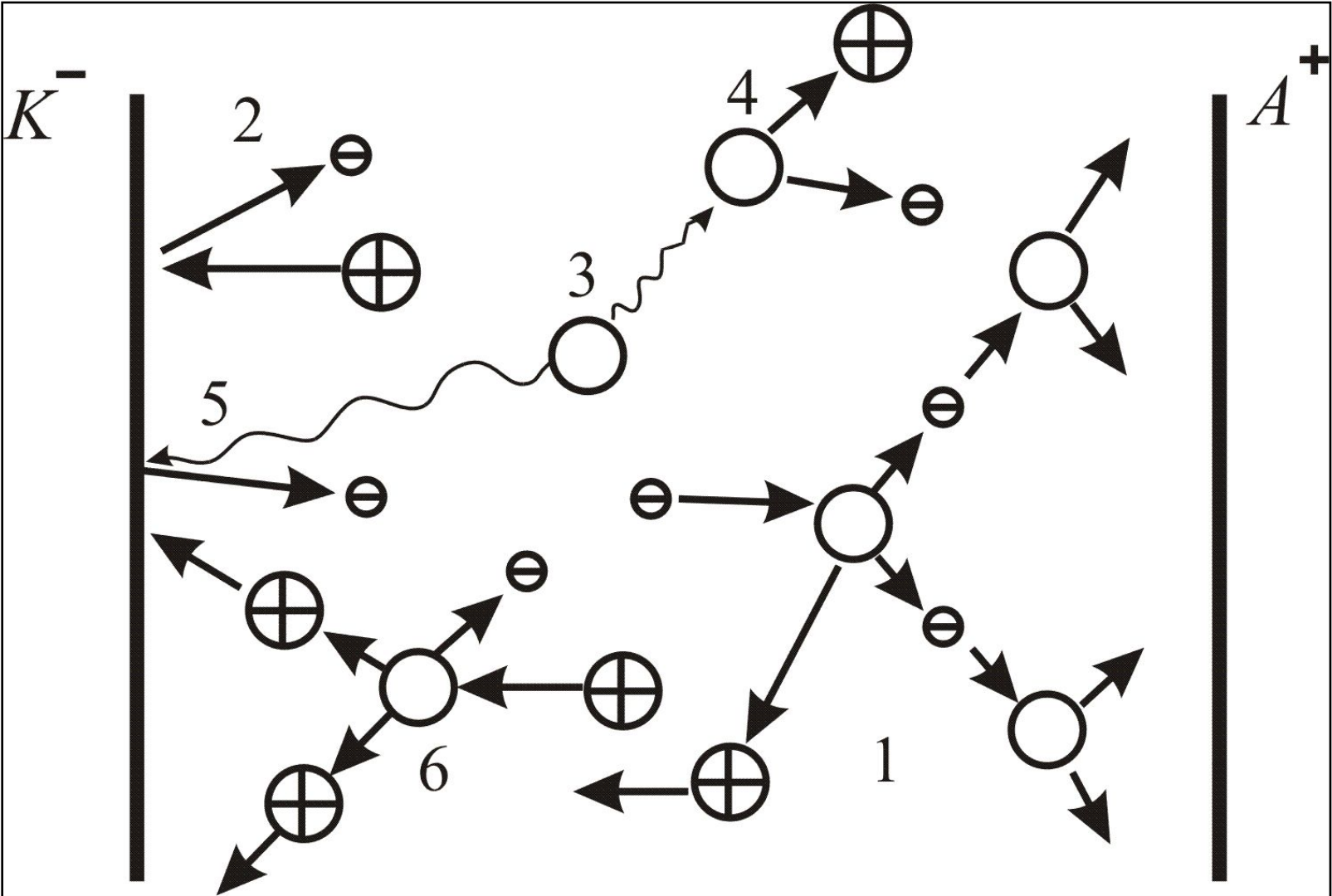
положительные ионы, сталкиваясь с молекулами
газа, переводят их в возбужденное состояние;
**переход таких молекул в основное состояние
сопровождается испусканием фотонов (процесс
3);**



фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит процесс фотонной ионизации молекул (процесс 4);

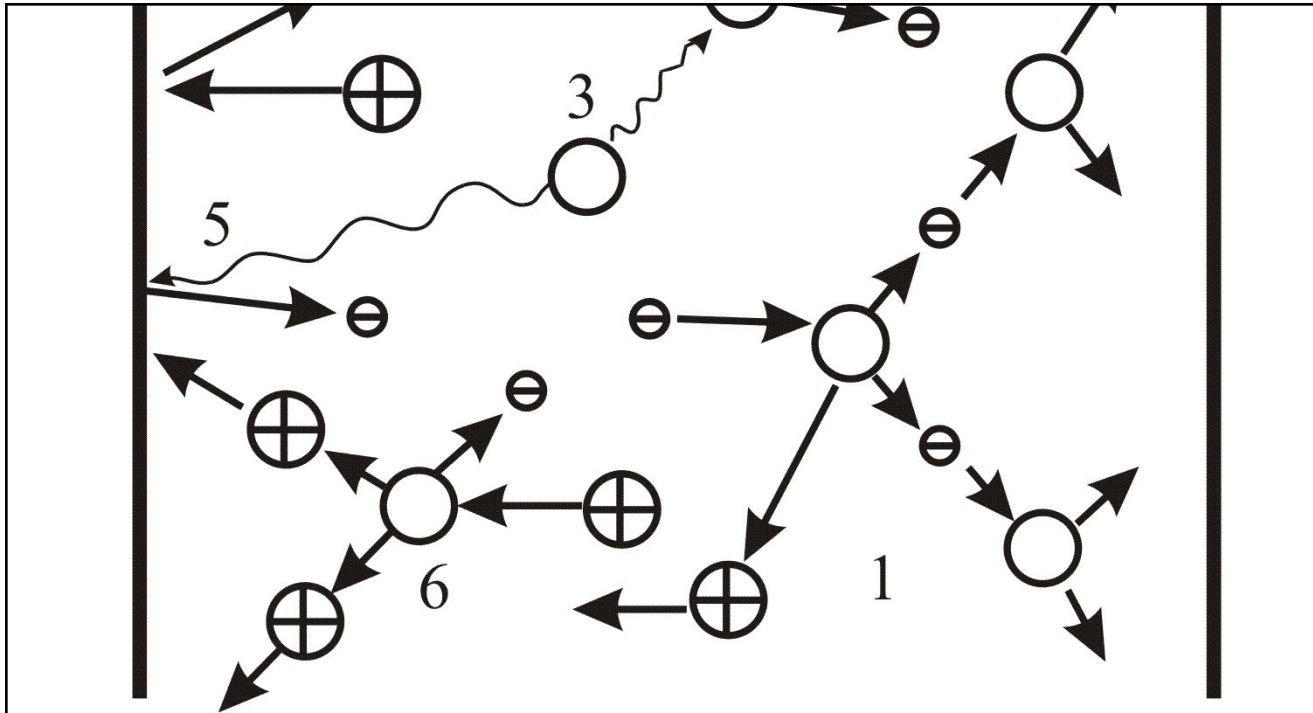


Выбивание электронов из катода под действием фотонов (процесс 5);



Наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда **положительные ионы, обладающие меньшей длиной свободного пробега, чем электроны, приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа (процесс б), и к отрицательной пластине устремляются ионные лавины.**

- Когда возникают, кроме электронных лавин, еще и ионные, сила тока растет уже практически без увеличения напряжения.



Рассмотрим условия возникновения и поддержания самостоятельного разряда.

- 1) При больших напряжениях между электродами газового промежутка ток сильно возрастает. Это происходит вследствие того, что возникающие под действием внешнего ионизатора электроны, сильно ускоренные электрическим полем, сталкиваются с нейтральными молекулами газа и ионизируют их, в результате чего образуются *вторичные электроны и положительные ионы (процесс 1)*.
- 2) ускоренные электрическим полем положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны (*процесс 2*);
- 3) положительные ионы, сталкиваясь с молекулами газа, переводят их в возбужденное состояние; переход таких молекул в основное состояние сопровождается испусканием фотонов (*процесс 3*);
- 4) фотон, поглощенный нейтральной молекулой, ионизирует ее, происходит процесс фотонной ионизации молекул (*процесс 4*);
- 5) выбивание электронов из катода под действием фотонов (*процесс 5*);
- 6) наконец, при значительных напряжениях между электродами газового промежутка наступает момент, когда положительные ионы, обладающие меньшей длиной свободного пробега, чем электроны, приобретают энергию, достаточную для ионизации молекул газа (*процесс 6*), и к отрицательной пластине устремляются ионные лавины. Когда возникают, кроме электронных лавин, еще и ионные, сила тока растет уже практически без увеличения напряжения.

12.4. Типы разрядов

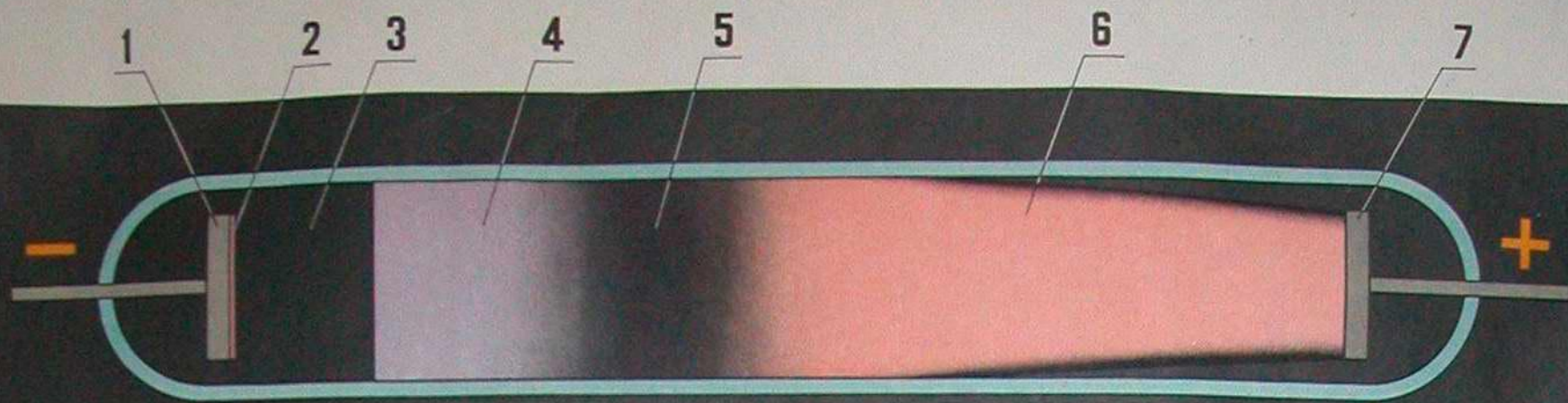
В зависимости от давления газа, конфигурации электродов и параметров внешней цепи существует четыре типа самостоятельных разрядов:

- тлеющий разряд;
- искровой разряд;
- дуговой разряд;
- коронный разряд.

Тлеющий разряд

- Тлеющий разряд возникает при низких давлениях.
- Его можно наблюдать в стеклянной трубке с впаянными у концов плоскими металлическими электродами.
- Вблизи катода располагается тонкий светящийся слой, называемый *катодной светящейся пленкой*

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД

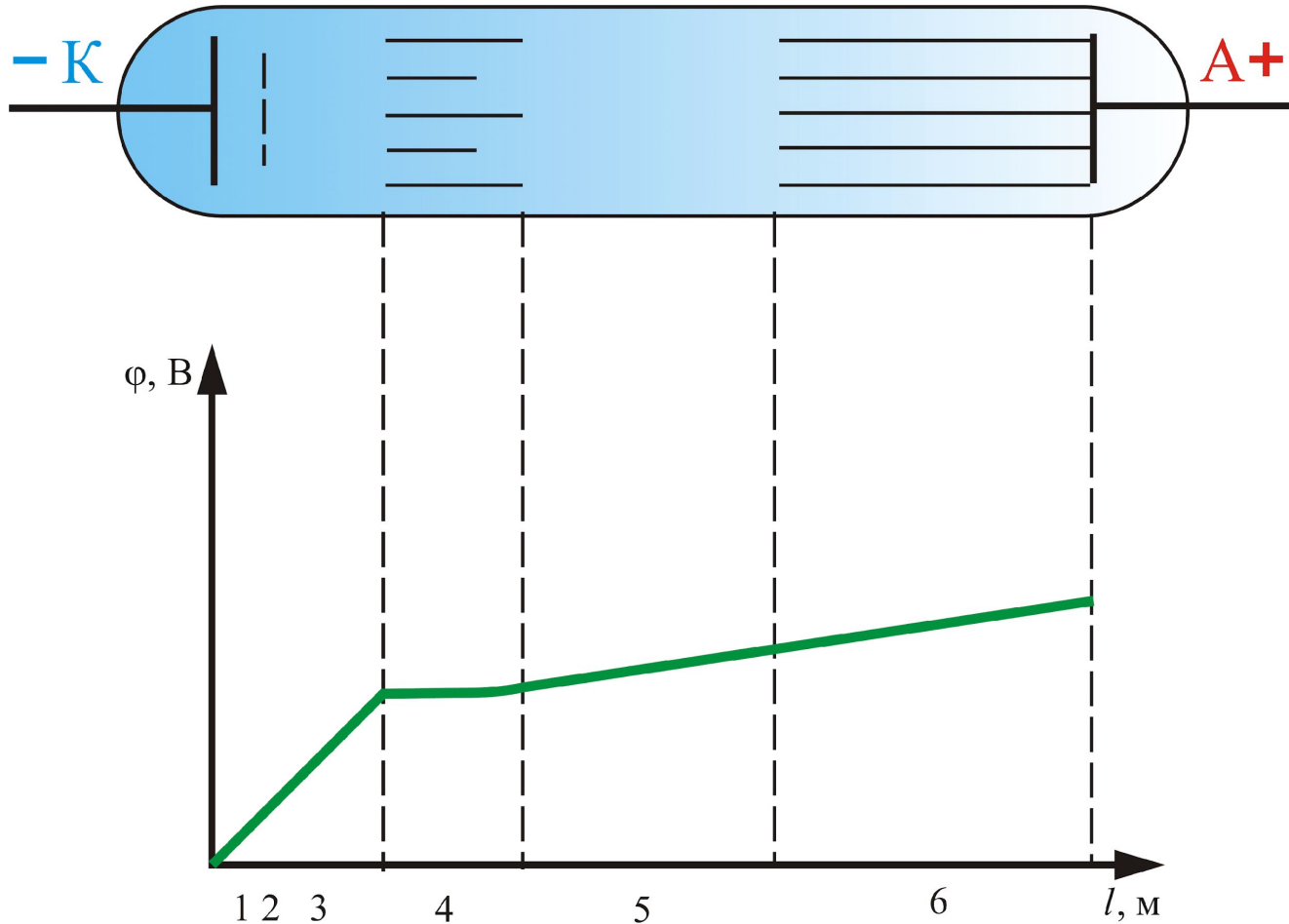


КАТОДНАЯ ТРУБКА

- 1 - КАТОД,
- 2 - КАТОДНАЯ СВЕЯЩАЯСЯ ПЛЕНКА,
- 3 - ТЕМНОЕ КАТОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО,
- 4 - ТЛЕЮЩЕЕ СВЕЧЕНИЕ (ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ),

- 5 - ТЕМНОЕ ФАРАДЕЕВО ПРОСТРАНСТВО,
 - 6 - ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ СВЕЧЕНИЕ,
 - 7 - АНОД
- U_k - КАТОДНОЕ ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Тлеющий разряд



1. Астоново темное пространство; 2. Катодная светящаяся пленка; 3. Катодное темное пространство; 4. Тлеющее свечение; 5. Фарадеево темное пространство; 6. Положительный столб.

Искровой разряд

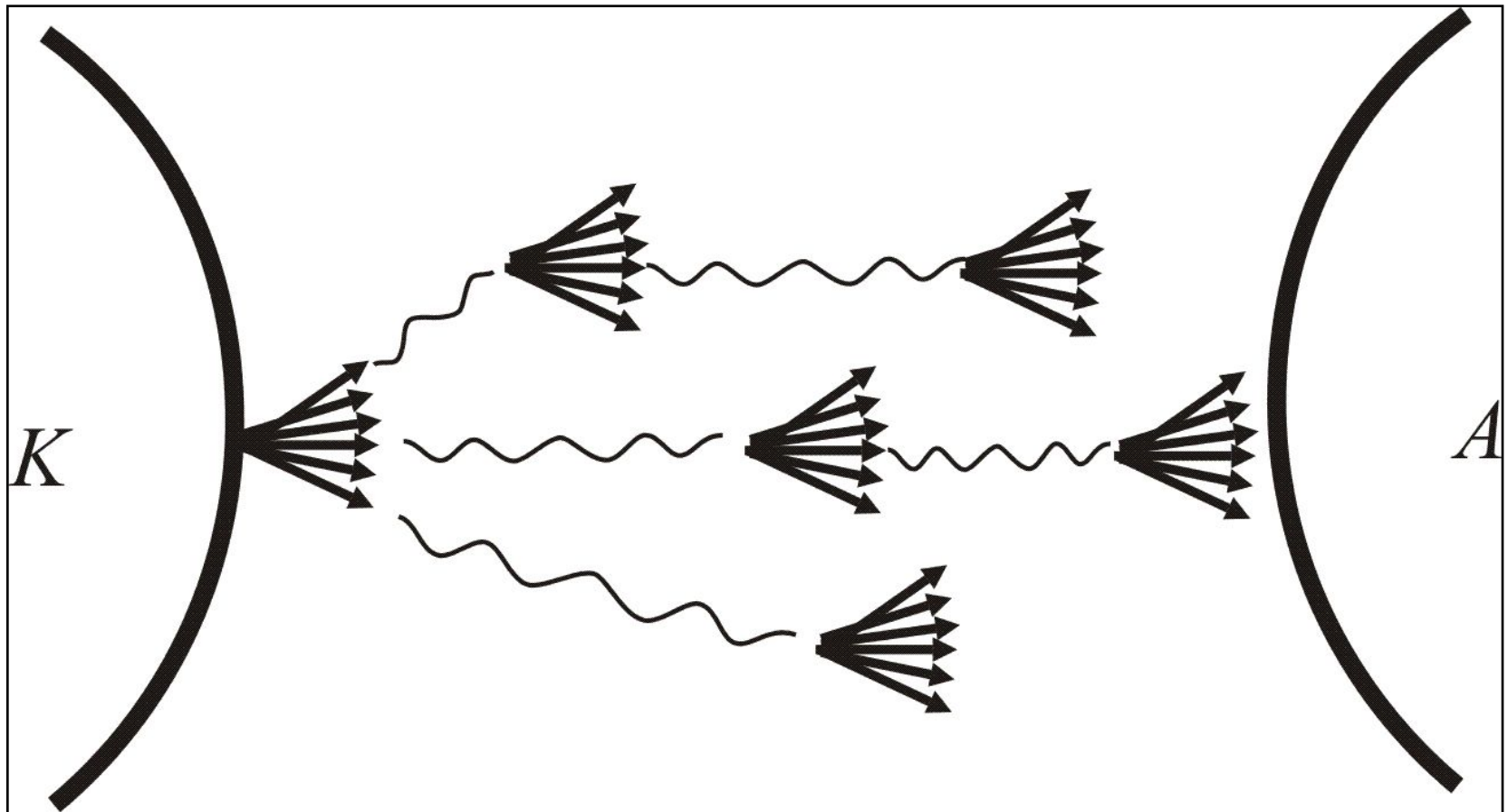
Искровой разряд возникает в газе обычно при давлениях порядка атмосферного.

Он характеризуется прерывистой формой.

По внешнему виду искровой разряд представляет собой пучок ярких зигзагообразных разветвляющихся тонких полос, мгновенно пронизывающих разрядный промежуток, быстро гаснущих и постоянно сменяющих друг друга.

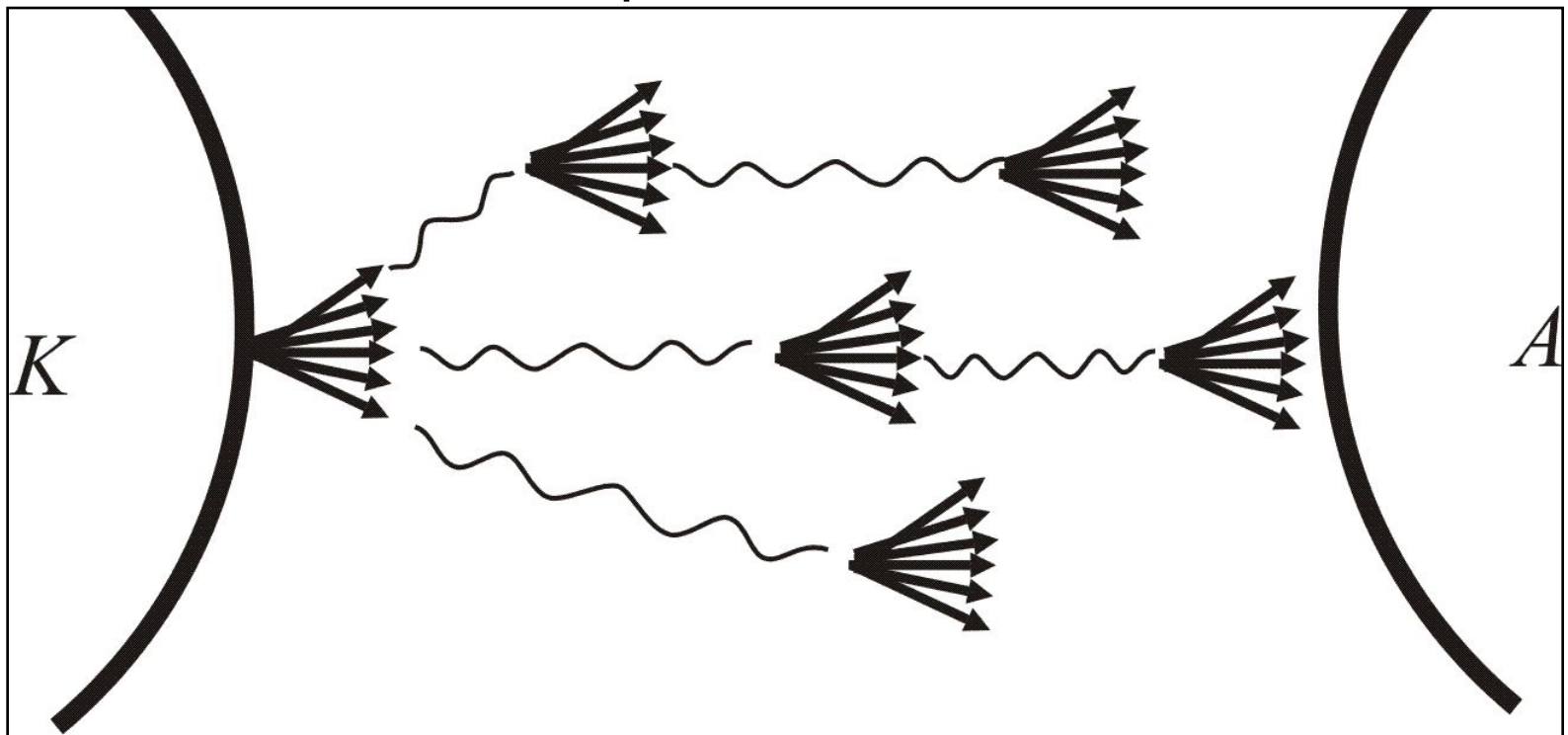
Эти полосы называют *искровыми каналами*.

Искровой разряд



$$T_{\text{газа}} = 10000 \text{ К}; \quad \Phi_{\text{канала}} \sim 40 \text{ см}; \quad I = 100 \text{ кА}; \quad t = 10^{-4} \text{ с}$$

- После того, как разрядный промежуток «пробит» искровым каналом, сопротивление его становится малым, через канал проходит кратковременный импульс тока большой силы, в течение которого на разрядный промежуток приходится лишь незначительное напряжение. Если мощность источника не очень велика, то после этого импульса тока разряд прекращается. Напряжение между электродами начинает повышаться до прежнего значения, и пробой газа повторяется с образованием нового искрового канала.



В естественных природных условиях искровой разряд наблюдается в виде **МОЛНИИ**.

На рисунке изображен пример **искрового разряда – молния**, продолжительностью $0,2 \div 0,3$ с силой тока $10^4 - 10^5$ А, длиной 20 км







- **Диаметр канала молнии**
- **равен примерно 1 см,**
- **температура в канале молнии**
- **равна примерно 25 000°C,**
- **продолжительность разряда**
- **составляет доли секунды.**



Ток молнии может достигать 1 млн А, напряженность поля пробоя (10-30) кВ/см

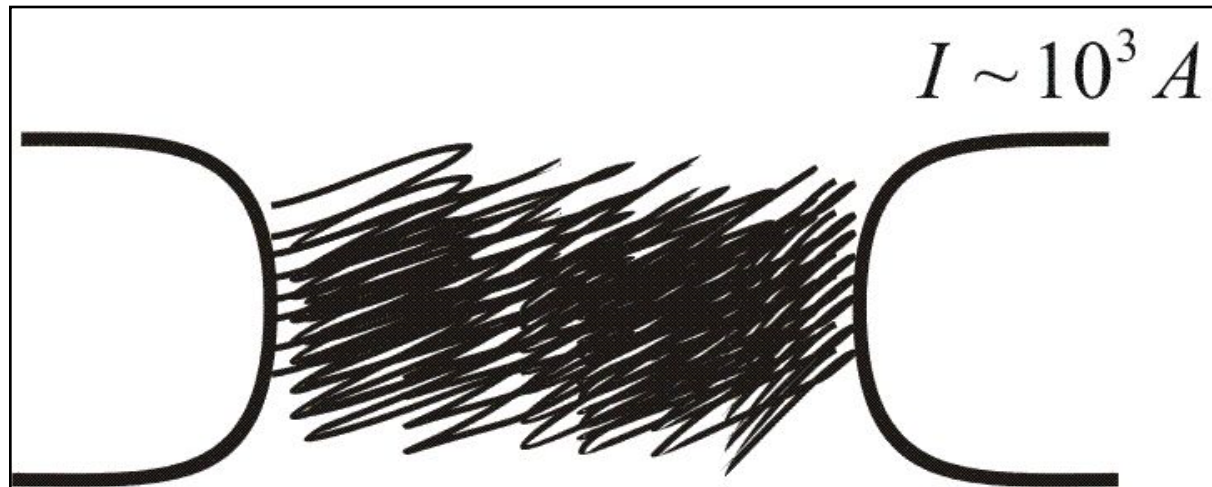


*Характерная
форма путей
разрядов*

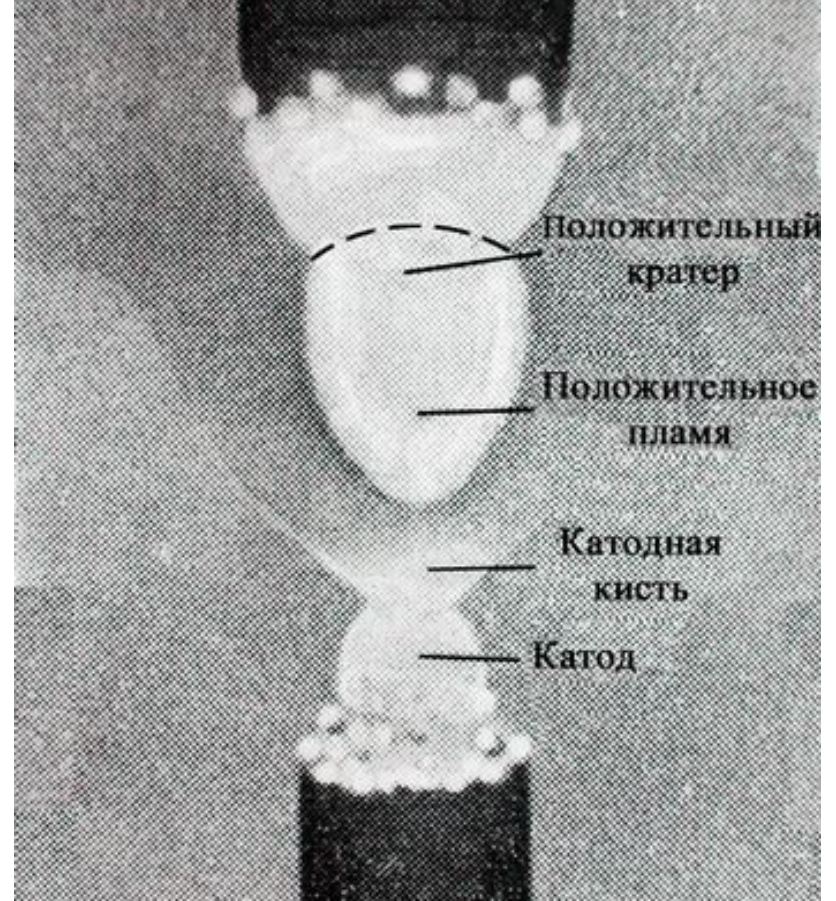
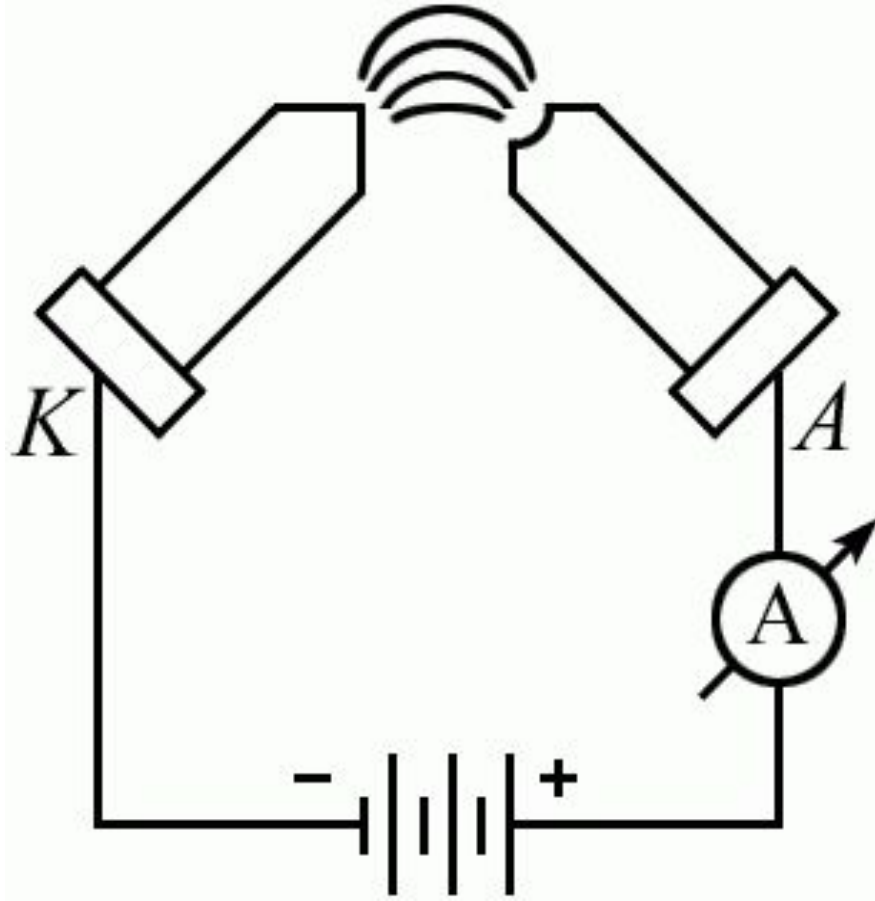


Дуговой разряд

- **Дуговой разряд.** Если после получения искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами, то разряд из прерывистого становится непрерывным возникает новая форма газового разряда, называемая **дуговым разрядом**.

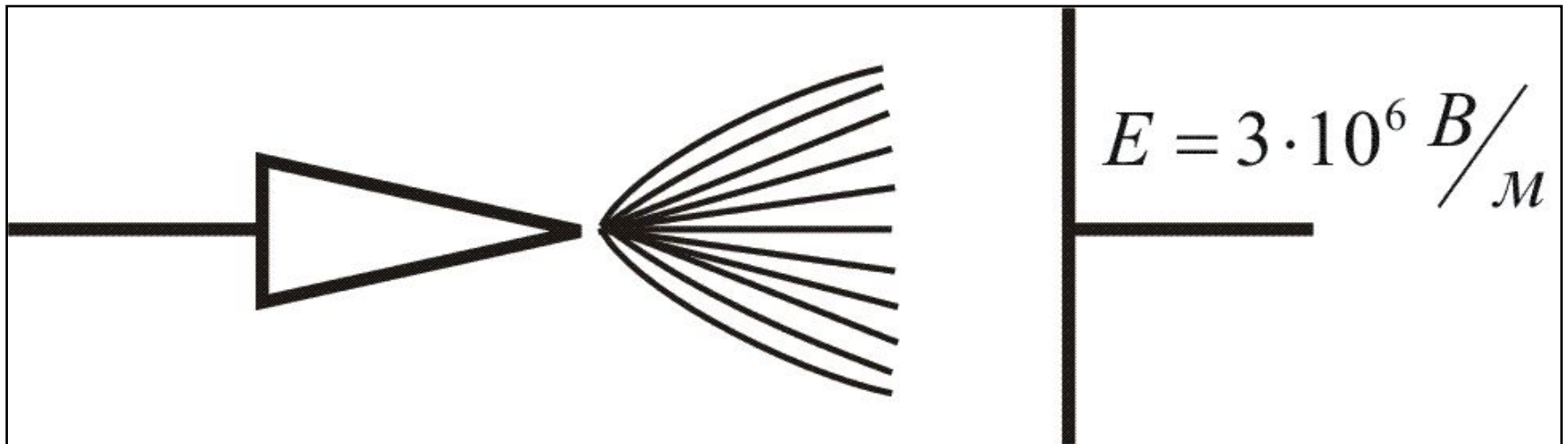


- **Ток** при дуговом разряде **резко увеличивается, достигая десятков и сотен ампер**, а **напряжение** на разрядном промежутке **падает до нескольких десятков вольт**.
- Дуговой разряд поддерживается, главным образом, за счет **термоэлектронной эмиссии с поверхности катода**.
- На практике – это **сварка, мощные дуговые печи**.



Коронный разряд

- **Коронный разряд** возникает в сильном неоднородном электрическом поле при сравнительно высоких давлениях газа (порядка атмосферного).
- Такое поле можно получить между двумя электродами, поверхность одного из которых обладает большой кривизной (тонкая проволочка, острие).



- Когда электрическое поле вблизи электрода с большой кривизной достигает примерно $3 \cdot 10^6$ В/м, вокруг него возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны, откуда и произошло название заряда.



12.5. Применение газового разряда

Самыми распространёнными приборами, основанными на явлении газового разряда, являются точные приборы, которые можно разделить на следующие групп шесть групп.

- Тиратроны и газотроны тлеющего разряда.
 - Стабиллитроны тлеющего и коронного разрядов.
- Счётчики коммутаторные векотроны.
- Индикаторы тлеющего разряда.
 - Газотроны тиратроны с наполненным катодом.
 - Импульсные водородные тиратроны с наполненным катодом.

Газоразрядные приборы очень разнообразны, и различаются видом используемого разряда.

Они используются для стабилизации напряжения, защиты от перенапряжения, выполнения переключательных функций, индикации электрического состояния и т. д.

- В последнее время для повышения защиты уязвимых и ответственных объектов, например, пусковых комплексов ракет, пытаются реализовать различные формы управления молнией, в частности лазерное инициирование молнии.

- Лазерное инициирование основано на создании в воздухе ионизованного канала с помощью лазерного излучения.

12.6. Понятие о плазме

- В газовом разряде возникает большое количество положительных ионов вследствие высокой эффективности ударной ионизации, причем концентрация ионов и электронов одинакова.
- Такая система из электронов и положительных ионов, распределенных с одинаковой концентрацией, *называется плазмой.*

Плазма, в которой выполняется равенство:

$$T_e = T_i = T_a$$

(где индексы «э», «и», «а» относятся к электронам, ионам, атомам) **называется изотермической.**

- Такая плазма имеет место при ионизации с помощью высокой температуры (дуга, горящая при атмосферном и выше давлении, искровой канал); например, в дуге сверхвысокого давления (до 1000 атм.) температура плазмы достигает 10000 К, температура плазмы при термоядерном взрыве – порядка нескольких десятков миллионов градусов, в установке «ТОКАМАК» для исследования термоядерных реакций – порядка $7 \cdot 10^6$ К

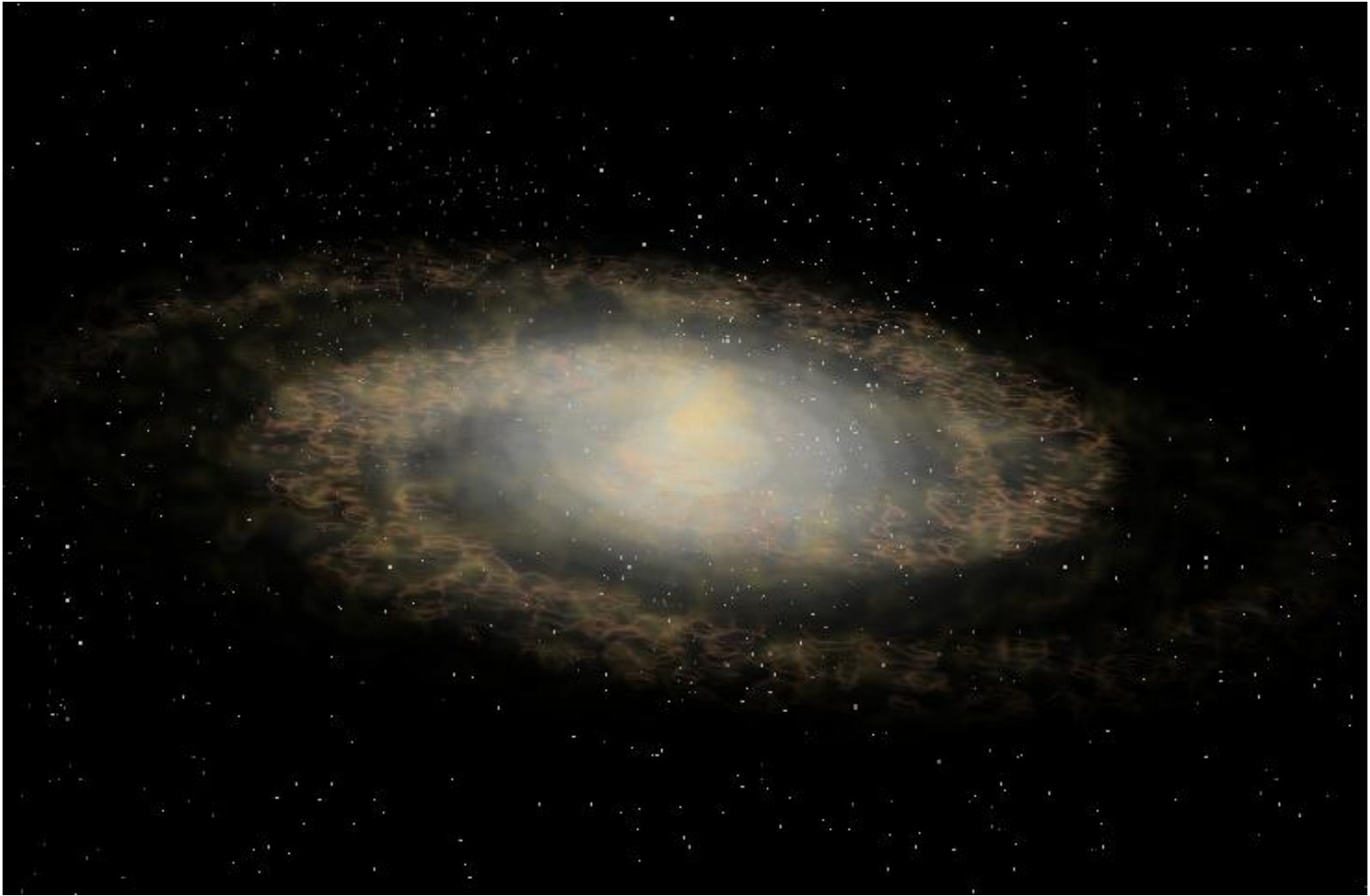
Важнейшие свойства плазмы:

- а) **сильное** взаимодействие с внешними магнитными и электрическими полями, связанное с ее высокой электропроводностью;
- б) **специфическое коллективное взаимодействие частиц** плазмы, осуществляющееся через усредненные электрические и магнитные поля, которые создают сами эти частицы;
- в) **благодаря коллективным взаимодействиям** плазма ведет себя как своеобразная упругая среда, в которой легко возбуждаются и распространяются различного рода колебания и волны (например, ленгмюровские колебания плазмы);
- г) **во внешнем магнитном поле** плазма ведет себя как диамагнитная среда;
- д) **удельная электрическая проводимость** σ полностью ионизованной плазмы не зависит от плотности плазмы и увеличивается с ростом термодинамической температуры, и при $T \geq 10^7$ К столь велика, что плазму можно приближенно считать идеальным проводником $\sigma \rightarrow \infty$

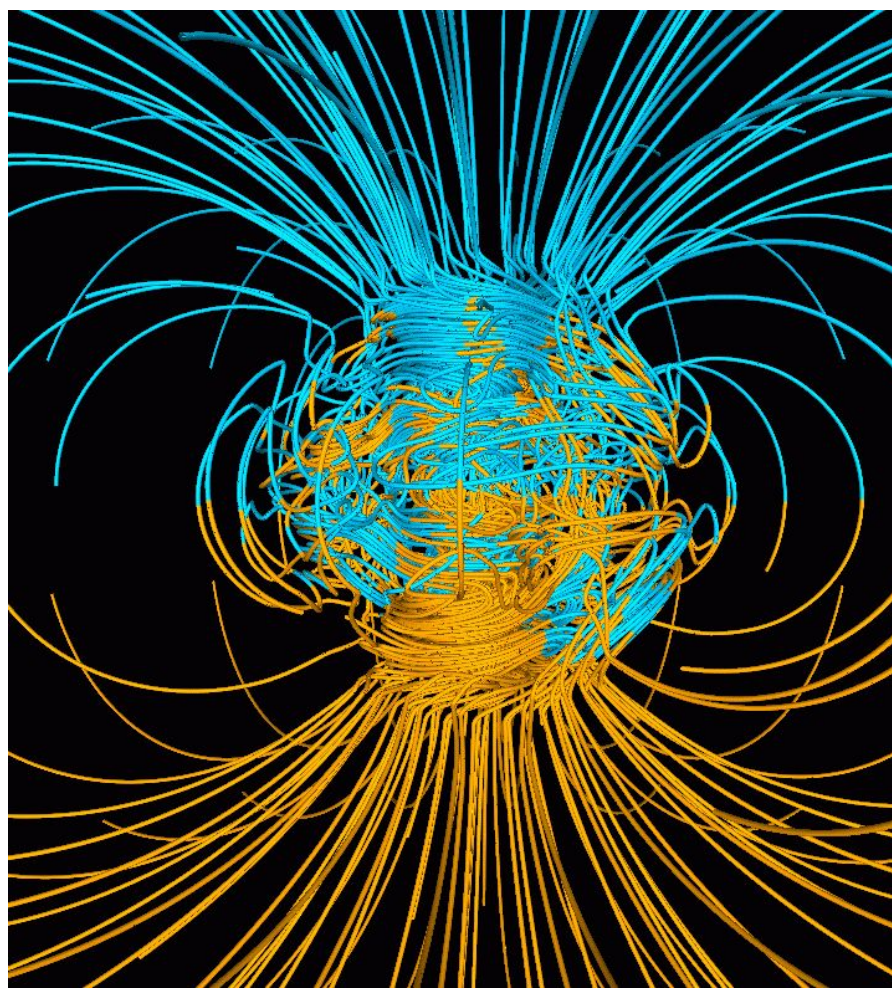
Плазма – наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной. Солнце и другие звезды состоят из полностью ионизованной высокотемпературной плазмы. Основным источником энергии излучения звезд – термоядерные реакции синтеза, протекающие в недрах звезд при огромных температурах.



Холодные туманности и межзвездная среда также находятся в плазменном состоянии.



В околоземном пространстве слабоионизованная плазма находится в радиационных поясах и ионосфере Земли. С процессами, происходящими в этой плазме, связаны такие явления, как магнитные бури, нарушения дальней радиосвязи и полярные сияния



*магнитосферными
электронами*



“высыпание” электронов 10-100 кэВ

Основной практический интерес к физике плазмы связан с решением проблемы **управляемого термоядерного синтеза – процесс слияния легких атомных ядер при высоких температурах** в управляемых условиях. Энергетический выход реактора составляет 10^5 кВт/м³ при температуре 10^8 К.

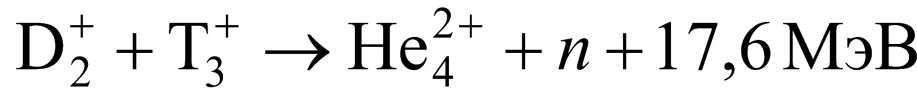


Схема токамака

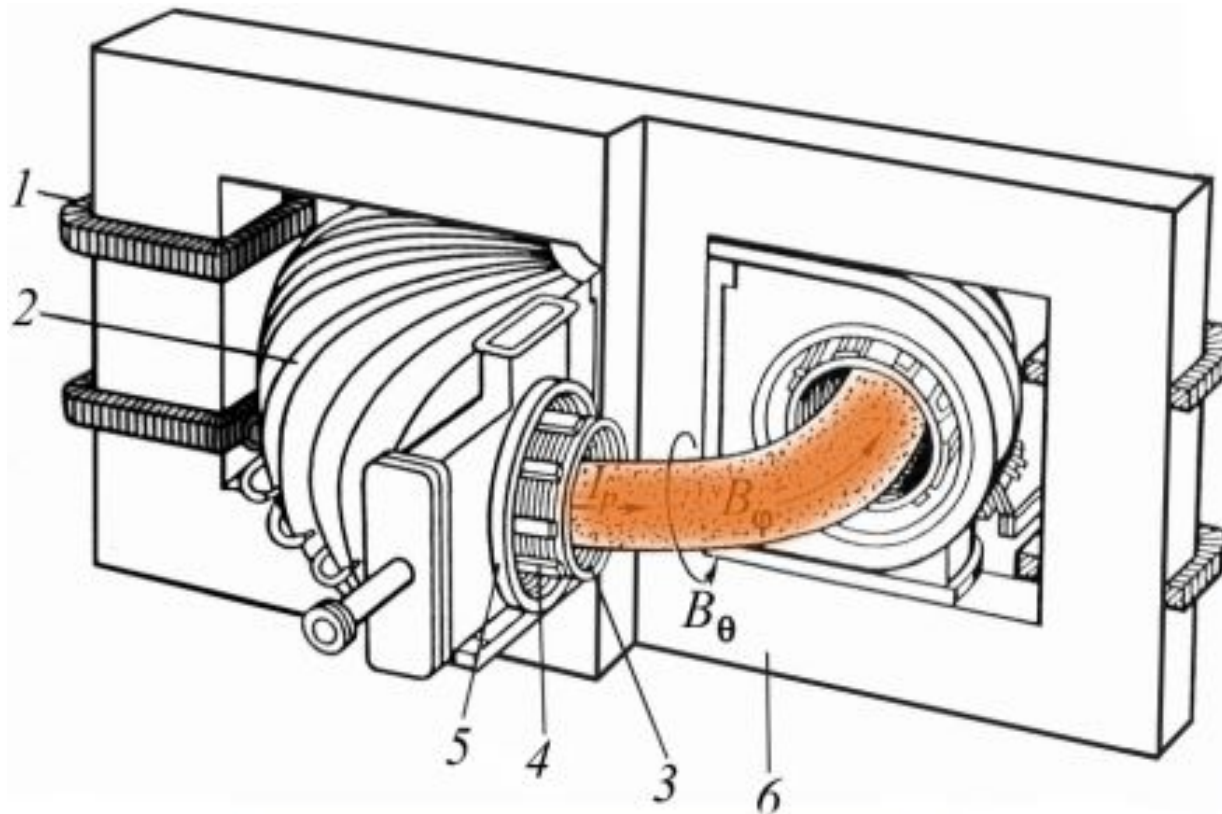
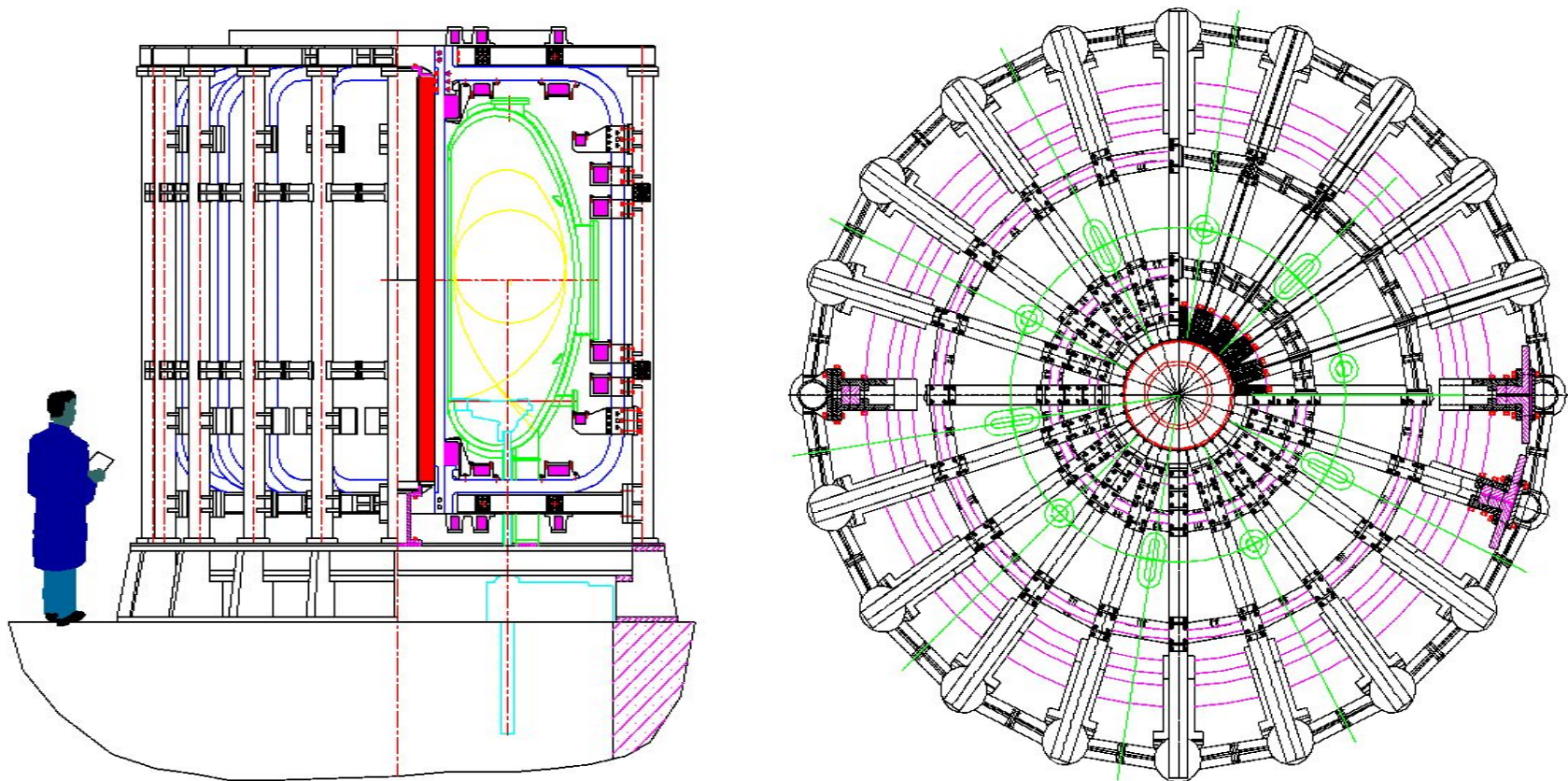


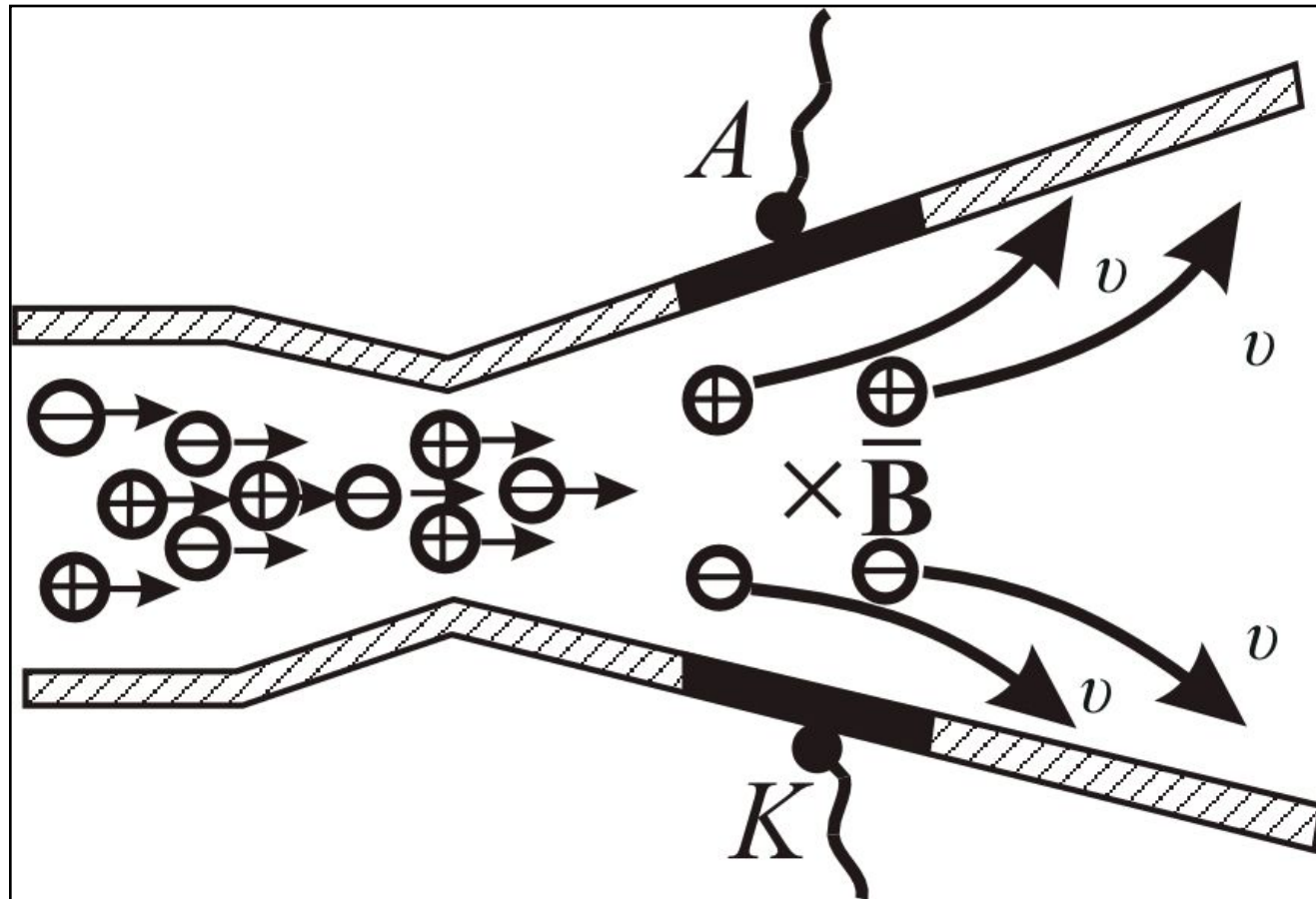
Схема Казахстанского токамака КТМ в сечении и его вид с вакуумной камерой



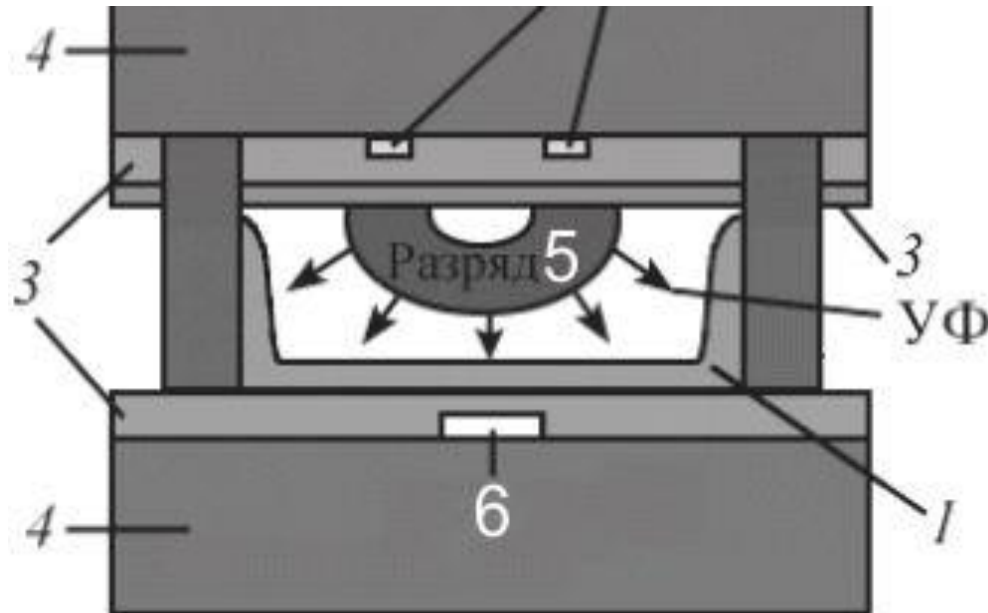
Осуществление управляемой термоядерной реакции в высокотемпературной плазме позволит человечеству в будущем получить практически неисчерпаемый источник энергии.

МГД - генератор

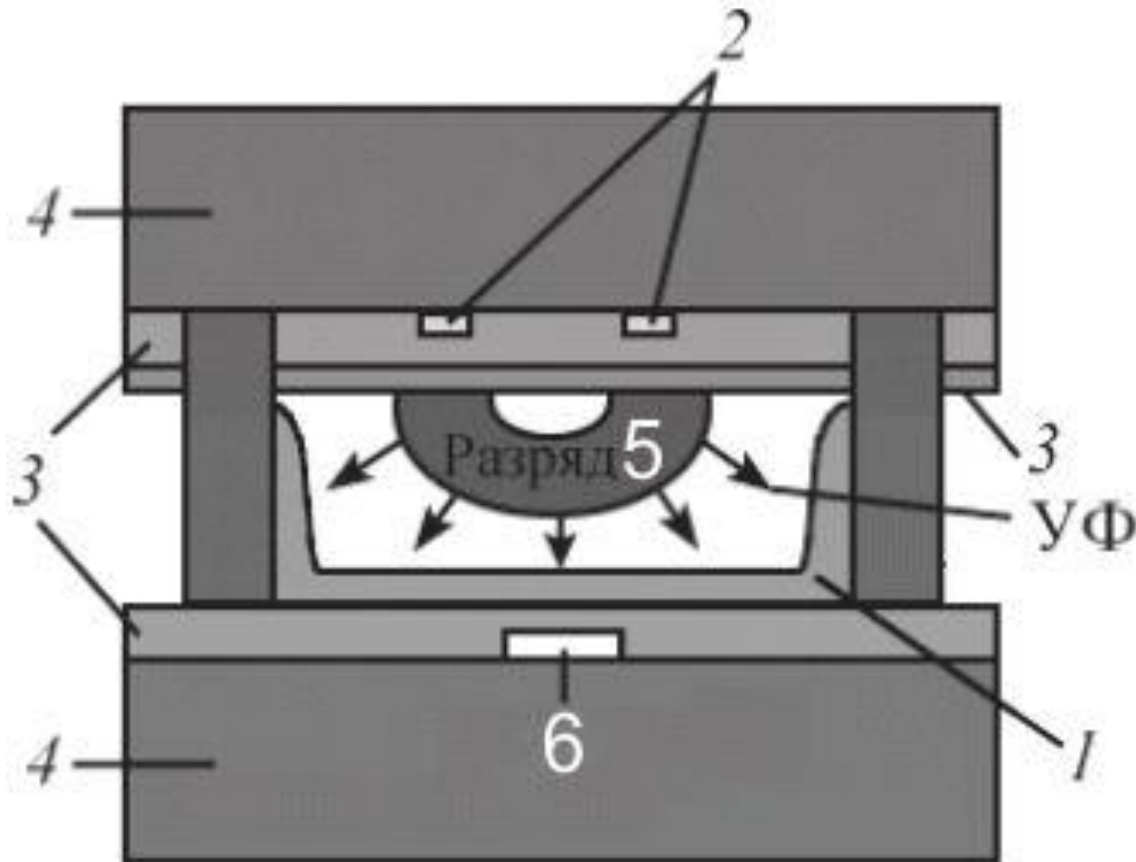
Движение плазмы в магнитном поле используется в методе прямого преобразования внутренней энергии ионизованного газа в электрическую. Этот метод осуществлен в *магнитогазодинамическом генераторе*



- Свойства плазмы излучать электромагнитные волны ультрафиолетового диапазона используются в современных телевизорах с плоским плазменным экраном.
- Ионизация плазмы в плоском экране происходит в газовом разряде. Разряд возникает при бомбардировке молекул газа электронами, ускоренными электрическим полем – самостоятельный разряд.



- Плоский телевизор с экраном из газоразрядных элементов содержит около миллиона маленьких плазменных ячеек, собранных в триады RGB – пиксели (*pixel – picture element*).



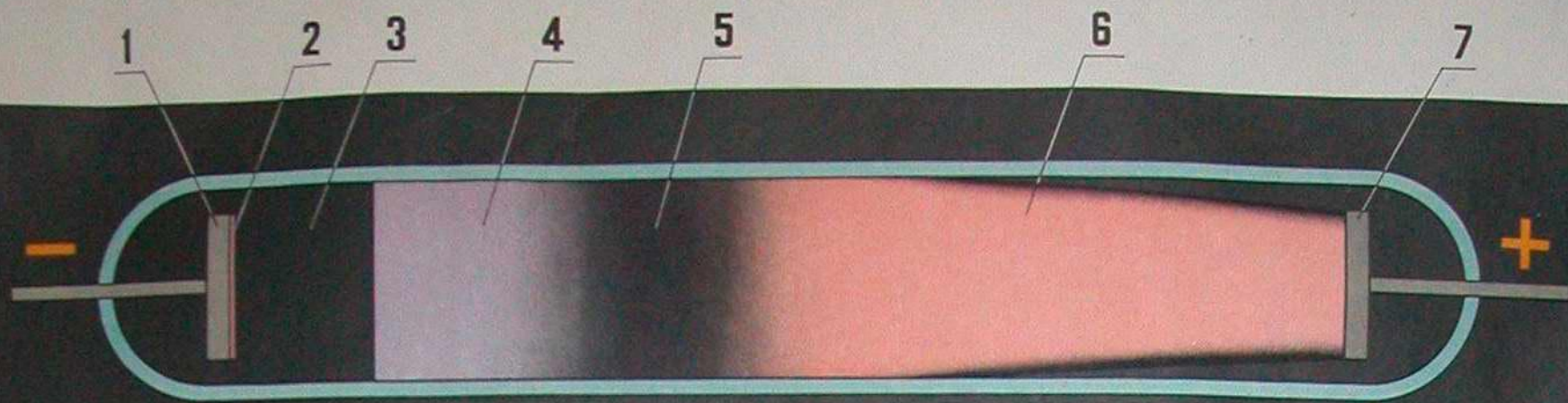
Сегодня: *

Лекция окончена.

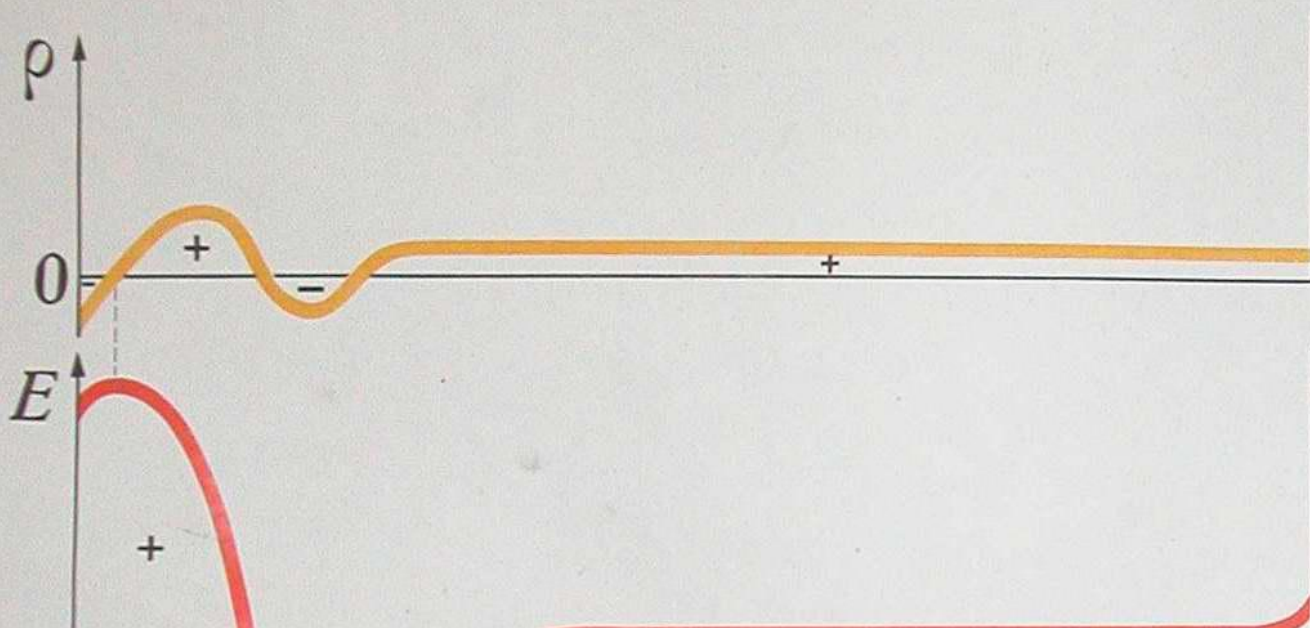
До свидания!

УРА! УРА! УРА!

ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД



КАТОДНАЯ ТРУБКА



- 1 - КАТОД,
- 2 - КАТОДНАЯ СВЕЧАЩАЯСЯ ПЛЕНКА,
- 3 - ТЕМНОЕ КАТОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО,
- 4 - ТЛЕЮЩЕЕ СВЕЧЕНИЕ (ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ),

- 5 - ТЕМНОЕ ФАРАДЕЕВО ПРОСТРАНСТВО,
 - 6 - ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ СВЕЧЕНИЕ,
 - 7 - АНОД
- U_k - КАТОДНОЕ ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

