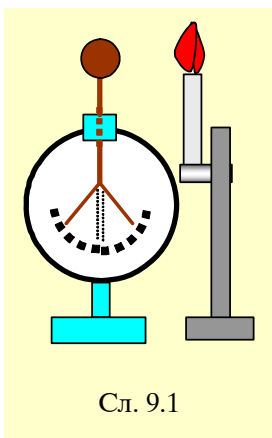


9. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА НИЗ ГАСОВИ

9.1. ЈОНИЗАЦИЈА И РЕКОМБИНАЦИЈА

Гасовите при нормални услови се многу лоши спроводници на електричната струја. Ако во сув воздух се донесе наелектризиран електроскоп ќе може да се забележи дека тој подолго време ќе остане наелектризиран. Тоа е затоа што помеѓу неговата глава и неговото тело има воздух којшто е многу добар изолатор.



Сл. 9.1

Состојбата ќе се промени ако во близина на електроскопот се донесе пламен од една свеќа (сл.1). Електроскопот веднаш се празни. Ако свеќата ја оддалечиме и од подалеку полека дуваме во свеќата, повторно може да дојде до неговото празнење. Што предизвикува празнење на електроскопот? Сигурно нешто што го има во пламенот на свеќата. Во пламенот на свеќата се наоѓаат јони и електрони. Тие се создаваат со горењето на фитилот и високата температура што се развива во гасот.

Да се потсетиме што е тоа јон? Ако од атомот се одвои еден или повеќе од најслабо врзаните електрони, тогаш атомот станува позитивен јон.

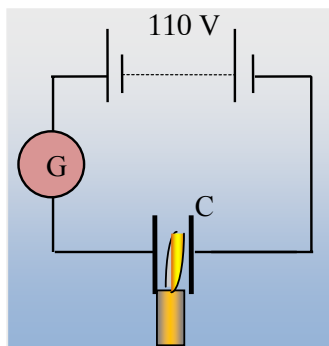
Велиме дошло до негова **јонизација**. Но, за да се случи тоа, треба на атомот да му се донесе некоја енергија. Откако атомот ќе ја прими енергијата, најслабо врзаниот електрон ќе може да ги совлада електро-статичките сили и да го напушти атомот. Во случајот со пламенот, до јонизација дошло поради високата температура на гасот. Заклучуваме дека до празнење на електроскопот доаѓа поради движењето на јоните и електроните помеѓу главата на електроскопот и неговото тело. Ова движење може да го сметаме за струја. **Значи, носители на струјата кај гасовите се електроните и јоните.**

Јонизација на гасовите можат да предизвикаат и други фактори, на пример, рендген зраците, ултравиолетови зраци или радиоактивните зраци. Предизвикувачите на процесот јонизација се викаат **јонизатори**.

При нормални услови, бројот на јоните и електроните предизвикани поради природното радиоактивно или космичко зрачење е многу, многу мал. Затоа гасот при нормални услови е изолатор.

Течењето струја кај гасовите често се вика **гасно празнење**.

Експеримент сличен на претходниот е скициран на сликата 9.2.



Сл.9.2. Јонизација на гас со топлина.

Се составува електрично коло како на сликата 9.2. Како инструмент се употребува многу осетлив галванометар G (осетливост и до 10^{-8} A).

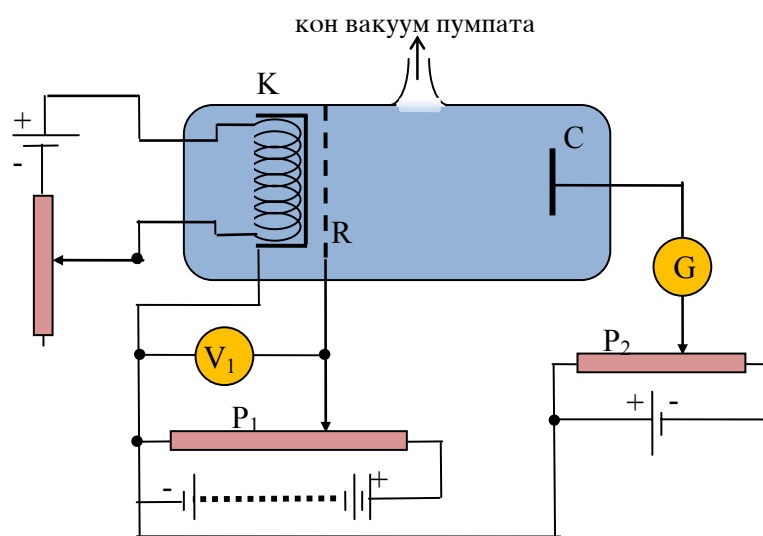
Ако меѓу кондензаторските плочи се предизвика јонизација, галванометарот ќе покаже отклон.

Како јонизатор, освен топлината од пламенот, може да се употребат и други видови јонизатори: ултравиолетова (УВ) лампа, насочен сноп рендген-зраци, радиоактивен извор и сл.

Појавата јонизација се карактеризира со некои физички величини. Така, минимална енергија што треба да му се даде на еден атом за тој да може да се јонизира се вика **енергија на јонизација** (W_j). Таа зависи од градбата на атомите, па затоа е различна за различните супстанции.

Енергија на јонизација може да се определи на најразлични начини. Подолу ќе опишеме еден од нив.

Процесот јонизација, покрај тоа што може да настане со помош на надворешен јонизатор, може да настане и со помош на судирање со електрони со голема енергија. Ако судирачкиот електрон има доволно голема кинетичка енергија тогаш при судир со неутрален атом може од него да избие еден или повеќе електрони кои се најслабо врзани, т. е да предизвика создавање на позитивен јон и електрони. На тој начин доаѓа до јонизација. Овој вид јонизација бил подробно испитуван од Франк и Херц во 1914 година (Franck Jemes, 1882-1964, Hertz Gustav, 1887-1975, внукот на Хајнрих Херц). Шемата на еден од типичните експерименти е



Сл. 9.3. Франк-Херцов експеримент

дадена на сликата 9.3.

Испитуваниот гас под притисок од ред на големина 10 -100 Pa се наоѓа во стаклен балон, кој претходно бил евакуиран, за да се елиминираат другите гасови.

Во евакуираната цевка има катода K, што се загрева, решетка R и колектор C. На решетката се донесува позитивен напон во однос на катодата кој може да се менува со помош на потенциометарот P_1 . Овој напон се мери со волтметрот V_1 . Колекторот за јони е поврзан со негативен потенцијал (од 0,5 до 1 V) во однос на катодата. Овој напон се донесува преку потенциометарот P_2 чијшто позитивен крај е поврзан со катодата.

Греењето на катодата се прави со помош на една спирално намотана грејна жичка доведена во контакт со катодата. Растојанието катода-решетка е значително помало од растојанието решетка колектор. Намалувањето на притисокот на гасот овозможува дотерување на средниот слободен пат на електроните во гасот, кој треба да биде поголем од растојанието катода-решетка. Така, електроните, емитирани со термоелектронска емисија од катодата се движат кон решетката, практично без судири. Ако разликата на потенцијалот помеѓу катодата и решетката е V , тогаш под влијание на полето секој електрон добива кинетичка енергија дадена со:

$$eV = \frac{mv^2}{2}$$

овде e е елементарен електричен полнеж, еднаков на полнежот на електронот, v - е брзината на електронот, m - неговата маса. Може да се каже дека електронот добива кинетичка енергија еднаква на V но изразена во електронволти (eV).

Електроните кои се забрзани со напонот на решетката потоа го продолжуваат својот пат во просторот помеѓу решетката и колекторот на кој се судираат со атомите на гасот.

Бидејќи колекторот е на понизок потенцијал од оној на катодата, тогаш кога нема јонизација, сите електрони се кочат и нема да стасаат до колекторот. Тоа значи дека низ колекторското коло (низ галванометарот) нема да потече струја.

Но, со постапно зголемување на напонот V , се зголемува јачината на полето меѓу катодата и решетката и при некоја доволно голема јачина, електроните добиваат енергија доволна за да можат при судир со неутрален атом да избијат електрон од неговата обвивка, поточно да извршат судирна јонизација. Значи, тогаш кога електронот ќе добие енергија еднаква на енергијата на јонизацијата меѓу решетката и колекторот, тогаш ќе се појават и позитивни јони. Тие ќе почнат да се движат кон колекторот, поради што галванометарот ќе регистрира

течење на струја. Така, со мерење на напонот V , може да се определи енергијата на јонизација на дадениот гас.

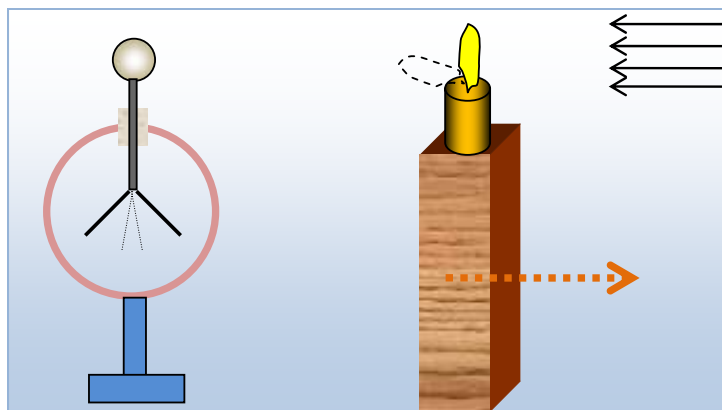
Ова не е единствениот метод за мерење на енергијата на јонизација. Многу поточно оваа величина може да се измери со спектрометриски методи.

Во табелата 9.1 се дадени енергии на јонизација за некои гасови. Вредностите се дадени во електронволти.

Табела 9.1

Елемент	He	Ne	Ar	Hg	Na	K	Rb
Енергија на јонизација во eV	24,5	21,5	13,9	10,4	5,12	4,32	4,68

По прекратувањето на дејството на јонизаторот, јоните во гасот не исчезнуваат веднаш, туку живеат уште извесно време. Во тоа може да не убеди експериментот скициран на сликата 9.4.



Сл. 9.4. Разелектризирање на електроскопот.

Ако пламенот на свеќата го одалечиме од наелектризиран електроскоп, а во него дуваме со слаб фен, електроскопот сепак ќе се разелектризира. Значи дека јоните создадени во пламенот се задржуваат во воздушната струја уште извесно време. Но тоа ќе станува сè до некое растојание. При некое растојание (над 1 метар) иако се дува во свеќата, до разелектризација на електроскопот не доаѓа. Ова покажува дека сега јоните учествувајќи во топлинското движење ќе се најдат во близина на избиените електрони и ќе се неутрализираат. При судир на еден едновалентен јон со електрон се создава неутрален атом. Овој процес на заемната неутрализација на јоните и електроните се вика процес на **рекомбинација** на јони.

Објасниме дека за да дојде до јонизација на неутрален атом треба да се потроши некоја енергија. При рекомбинација на позитивен јон и електрон, обратно, енергија се ослободува. Најчесто таа се ослободува во вид на светлина. Затоа во процесот на рекомбинација на јони доаѓа до светење на гасот.

Јонизацијата е појава којашто се карактеризира со физичката величина **степен на јонизација** α . Што е тоа?

Нека со n_0 ја означиме концентрацијата на молекулите на гасот:

$$n_0 = \frac{n}{V_g} \quad (9.1)$$

при што n е вкупниот број молекули на гасот а V_g неговиот волумен (Внимание: во ознаката на волуменот го ставаме индексот g за да не се побрка оваа ознака со ознаката на напонот). Делот од тие молекули што е јонизиран е N , така што концентрацијата на јонизираниите молекули N_0 е:

$$N_0 = \frac{N}{V_g}. \quad (9.2)$$

Односот помеѓу бројот на јонизираниите молекули и вкупниот број молекули (n) се нарекува степен на јонизација α :

$$\alpha = \frac{N}{n} = \frac{N_0}{n_0} \quad (9.3)$$

Обично, кај гасовите, при нормални услови овој однос е многу мал и изнесува приближно 10^{-12} до 10^{-10} .

Нека во дадениот волумен на гасот (V_g) под влијание на некој јонизатор се појавил некој број на јонизирани молекули (dN). Тој број е пропорционален со бројот на нерекombинирани молекули n и времето за кое јонизаторот дејствувал dt :

$$dN = \beta n dt \quad (9.4)$$

Овде β се вика **коефициент на јонизација**. Тој коефициент зависи од енергијата на јонизаторот.

Паралелно со процесот јонизација во гасот тече и процесот на рекомбинација. Бројот на рекомбинираните молекули (dN_r) во истиот волумен V_g , и за исто време dt е пропорционален како на бројот на позитивните јони N , така и на бројот на електроните N , па така веројатноста за да настане рекомбинација е пропорционална со квадратот на бројот на јонизираниите молекули N^2 . Освен тоа, таа е пропорционална и на времето dt , а обратно пропорционална со волуменот на гасот V_g . Всушност, колку се јоните и електроните

поблизу еден до друг толку е веројатноста за нивна рекомбинација поголема. Значи:

$$dN_r = \frac{\gamma N^2 dt}{V_g} \quad (9.5)$$

или

$$dN_r = \gamma N_0^2 V_g dt \quad (9.6)$$

Коефициентот γ се вика **коефициент на рекомбинација**, и тој зависи од природата на гасот.

По извесно време од почетокот на јонизацијата, кога ќе се воспостави динамичка рамнотежа, тогаш брзината со која настанува јонизацијата ќе се изедначи со брзината со која доаѓа до рекомбинацијата :

$$\frac{dN_r}{dt} = \frac{dN}{dt} \quad (9.7)$$

а бидејќи бројот на неутралните (нејонизирани атоми) поради малото α е:

$$n' = n - N = n - \alpha n = n(1 - \alpha) \approx n \quad (9.8)$$

Тоа значи дека

$$dN = \beta n' dt = \beta n dt = \beta n_0 V_g dt \quad (9.9)$$

па имајќи ја предвид релацијата 9.6 во услови на динамичка рамнотежа ќе се добие

$$\gamma N_0^2 V_g dt = \beta n_0 V_g dt$$

откаде што за концентрацијата на јонизираниите молекули N_0 се добива

$$N_0 = \sqrt{\frac{\beta n_0}{\gamma}} \quad (9.10)$$

Релацијата (9.10) ја дава концентрацијата на јонизираниите атоми (молекули) во состојба на динамичка рамнотежа. β е коефициент на јонизација, а γ коефициент на рекомбинација.

Пример

Во “јонизациона комора” со рамни електроди, (со плоштина на плочите A и меѓусебно растојание l) создаден е, со помош на рендген зраци како јонизатор, извесен број јони. Нека тој почетен број во единица волумен го означиме со N_p . Ако претпоставиме дека јонизаторот ќе се отстрани, како ќе се менува концентрацијата на јоните во зависност од времето. Познат е коефициентот на рекомбинацијата γ .

Решение

Намалувањето на бројот јони по отстранувањето на јонизаторот станува заради рекомбинацијата на јоните. Според (9.6) и (9.7) ќе биде:

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma N_0^2 V_g \quad ; \quad N_0 = \frac{N}{V_g} \Rightarrow \frac{dN}{dt} = -\frac{\gamma N^2}{V_g}$$

Оваа релација може да се запише и како:

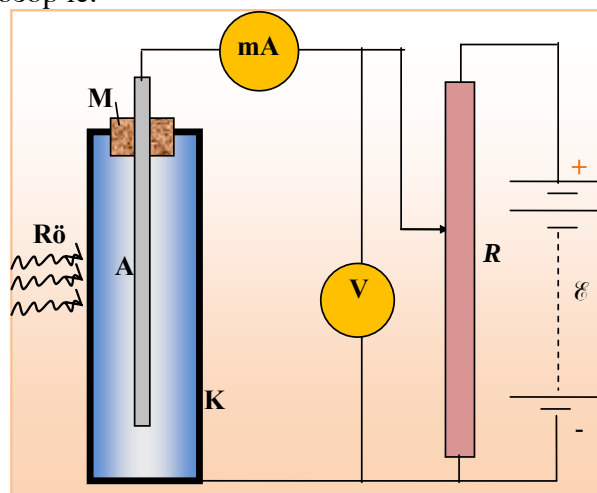
$$\frac{dN}{N^2} = -\frac{\gamma}{V_g} dt$$

Со интеграција на оваа равенка, имајќи предвид дека при $t=0$ $N=N_p$, како и дека волуменот $V_g = l A$ ќе се добие:

$$N = \frac{N_p l A}{\gamma N_p t + l A}.$$

9.2. Несамостојно празнење

За испитување на процесот на течење струја под влијание на надворешен јонизатор, да разгледуваме што станува во таканаречената јонизациона комора, која нашла примена, и чија што шема е прикажана на сликата 9.5. Телото на садот кое е наполнето со гас, обично служи како катода, а анодата има форма на прачка. Таа е изолирана од телото со добар изолаторски дел (М) од килибар, порцелан или специјална изолаторска пластмаса. Интензивното (рендген, гама или космичко) зрачење поминува низ ѕидот на комората. За β или α зрачење се користи специјално прозорче.



Сл. 9.5. Јонизациона комора.

Електродите (А и К) се поврзани потенциометарски со извор на ЕМС од неколку стотици или илјади волти. Со промена на напонот меѓу електродите и мерење на јачината на струјата во колото може да се добие волт-амперска карактеристика на гасното празнење во комората.

Волт-амперска карактеристикае прикажана со кривата дадена на сликата 9.6.

Прво, она што може веднаш да се заклучи е дека оваа зависност не е праволиниска (како кај Омовиот закон за металите) т.е. омска. Имено, само во малиот дел од кривата, т.е. кога

напонот се менува од нула до V_1 зависноста е линеарна, во интервалот на напони од V_1 до V_2 , линеарноста се нарушува и порастот на струјата станува побавен од порастот на напонот. Најпосле, при напони поголеми од V_3 настанува заситување (сатурација). Струјата е константа и еднаква на струја на заситување I_{sat} .

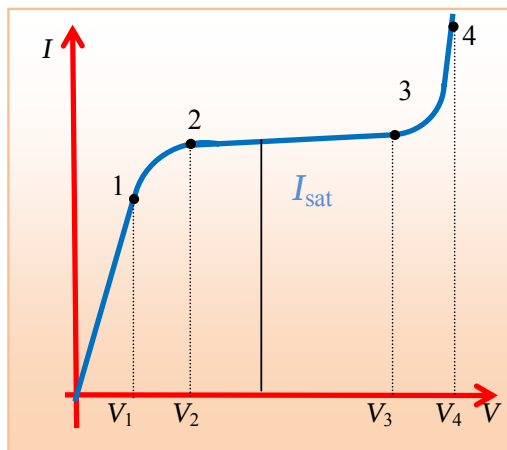
За да го објасниме ова однесување ќе ја пресметаме јачината на струјата во комората. Заради поеднастување на пресметките ќе претпоставиме дека двете електроди се паралелни рамнини, поставени на мало растојание d , така што може да се смета дека полето меѓу нив е хомогено, а густината на струјата е иста во сите точки паралелни со рамнините.

Густината на струјата, слично како кај електролитите, може и овде да се изрази со релацијата:

$$j = Q(N_+ v_+ + N_- v_-) = e(N_+ b_+ + N_- b_-)E \quad (9.11)$$

Во оваа формула b_+ е подвижност на позитивните јони, а b_- подвижност на електроните, N_+ концентрација на позитивните јони, N_- концентрација на негативните носители.

Треба да се напомене дека движење на јоните во гасовите е многу посложено отколку движењето јони во растворите на електролитите, или движењето на електрони во металите. Во металите дури и при многу силни струи, концентрацијата на електроните е константна во целиот волумен на металот. Кај гасното празнење се среќава нерамномерна распределба на јони меѓу електродите, а тоа значи



Сл.9.6. Волт-амперска карактеристика на јонизационата комора.

постои градиент на концентрацијата на јоните ($\frac{dN_0}{dx}$), поради што се јавува и појавата дифузија на јони, односно електрони.

Полнеж, пренесен од позитивните јони поради дифузијата низ единица плоштина на нормална површина, во единица време е:

$$- QD_+ \frac{dN_+}{dx}, \text{ каде што } D_+ \text{ е коефициент на дифузија на позитивните}$$

јони, Q - полнеж на јоните. Полнежот на јоните кои ја поминуваат истата површина во единица време се движат и поради постоење на полето E е: $QN_+ b_+ E$. Значи, густината на струјата што се должи на позитивните полнежи тогаш ќе биде:

$$j_+ = QN_+ b_+ E - QD_+ \frac{dN_+}{dx} \quad (9.12)$$

Аналоган израз се добива и за негативните полнежи (електрони):

$$j_- = QN_- b_- E + QD_- \frac{dN_-}{dx} \quad (9.13)$$

Во вторава релација полнежот Q носи негативн знак, но и полето е обратно насочено во однос на правецот на движењето.

Вкупната струја е збир од струите од позитивните јони и електроните:

$$j = j_+ + j_- \quad (9.14)$$

Концентрациите N_+ и N_- во гасот не мора насекаде да се еднакви меѓусебно, ниту не и на N_0 . Затоа се јавуваат и волуменски (просторни) полнежи кои предизвикуваат сложена распределба на потенцијалот помеѓу електродите.

Втор факт што предизвикува сложеност на проблемот кај гасовите е предизвикан од промената на концентрацијата на јоните со течење на струјата низ гасот. Со порастот на струјата се намалува концентрацијата на јоните па зависноста на струјата од потенцијалот е една доста сложена функција.

За да го илустрираме тоа, ќе го побараме условот за динамичка рамнотежа меѓу процесите јонизација и рекомбинација во присуство на струја. Напомнуваме дека за нерамномерната распределба на концентрациите нема да водиме сметка.

Течењето струја од просторот помеѓу електродите за време dt ќе однесе определен број јони dN_{st} :

$$dN_{st} = \frac{dQ}{e} = \frac{Idt}{e} = \frac{jAdt}{e} \quad (9.15)$$

Условот за динамичка рамнотежа во присуство на струја тогаш ќе биде:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN_r}{dt} + \frac{dN_{st}}{dt} \quad (9.16)$$

или

$$\beta n_0 V_g = \gamma N_0^2 V_g + \frac{jA}{e} \quad (9.17)$$

Ако релацијата (9.17) ја поделиме со волуменот V_g , а имајќи предвид дека растојанието меѓу електродите е $d = V_g / A$, тогаш релацијата се сведува на:

$$\beta n_0 = \gamma N_0^2 + \frac{j}{ed} \quad (9.18)$$

Овде n_0 е концентрација на молекулите, j -густината на струјата.

Се гледа дека концентрацијата на јоните N_0 е функција од густината на струјата. Ако ова N_0 би го пресметале според (9.18) и замениле во (9.11), тогаш би ја добиле зависноста на густината на струјата $\vec{j}$ од јачината на полето $\vec{E}$, односно волт-амперната карактеристика на гасниот процес на празнење. Таа зависност е всушност претставена на графикот од сликата 9.6.

За да ја појасниме оваа зависност, ќе разгледаме два гранични случаја. Првиот граничен случај е при ниските забрзувачки напони помеѓу А и К, т.е. кога бројот на јоните однесен од струјата е значително помал од рекомбираните јони, т.е. $dN_{st} \ll dN_r$. Тогаш вториот член од релацијата (9.18) може да се занемари, па се добива равенството (9.10). Следува дека концентрацијата на јоните N_0 практично не зависи од струјата, па поради тоа и густината на струјата, а со тоа и нејзината јачина е пропорционална со јачината на полето E , односно напонот V . Ова подрачје одговара на линеарната зависност од графикот на сликата 9.6, т.е. делот помеѓу точките 0 и 1 на карактеристиката на празнењето.

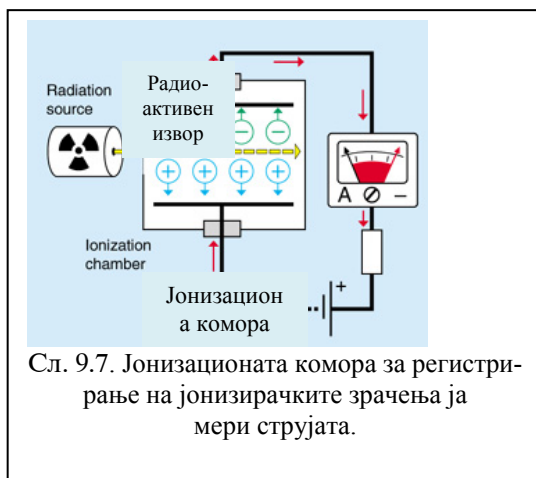
Втор граничен случај би бил обратниот, кога $dN_{st} \gg dN_r$, значи струјата е толку голема што практично сите јони бргу се одвлекуваат со струјата па до рекомбинација на јоните воопшто не доаѓа. Тогаш, првиот член во релацијата 9.18 може да се занемари па ќе се добие:

$$\beta n_0 = \frac{j_{sat}}{ed}$$

Откаде што се гледа дека струјата на заситување j_{sat} воопшто не зависи од полето. Оттука следува дека јачината на струјата при заситување I_{sat} е дадена со:

$$I_{sat} = \beta n_0 e A d = \beta n_0 V_g e \quad (9.19)$$

Се гледа дека струјата на заситување е пропорционална со волуменот на комората V_g , концентрацијата на молекулите на гасот n_0 . Со други



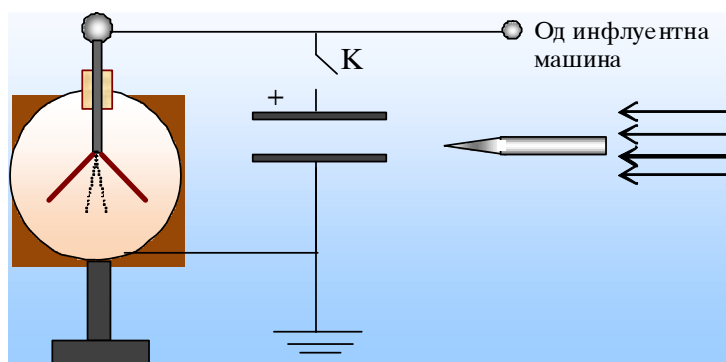
зборови таа зависи од притисокот на гасот и од коефициентот на јонизацијата на гасот β .

Така, со помош на јонизационата комора напојувана за да работи во режимот на струјата на заситување, можат да се споредуваат јонизационите способности на различните видови јонизирачки зрачења. Токму тој факт се користи во нуклеарната физика, каде што

јонизационите комори широко се применуваат за испитување на различни видови зрачења.

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

1. На кој начин со еден пламеник може да се елиминираат полнежите од една наелектризирана стаклена прачка?
2. Зошто при вообичаени услови, и при сите мерки на предострожност, наелектризираниот електроскоп по некое време ќе се разелектризира?
3. Објаснете го следниот експеримент: набиен електроскоп се поврзува со облогите на плочест кондензатор како на сликата 9.8.



Сл. 9.8

Незаземјената облога на кондензаторот е наелектризирана со поврзување со електростатската инфлуентна машина, и тоа со позитивниот пол. Ако се исклучи контактот К со машината, а со помош на истата машина се

наелектризира изолиран шилец, со поларитет спротивен (негативен) и со фен се дува, кон кондензаторот брзо ќе дојде до негово празнење. До празнење ќе дојде и без дување со фен, ако шилецот е доволно близу.

3. Пример задача

Помеѓу плочите на еден кондензатор со плошина $A=100 \text{ cm}^2$, поставени на растојание од 5 cm една од друга, создадена е јонизација на воздух со помош на рендген зраци и се добила струја на заситување од 10^{-7} A .

- Определете ја концентрацијата на паровите електрон-едновалентен јон во една секунда.
- Определете го коефициентот на јонизација β на рендген зрачењето, ако се знае дека температурата на воздухот е 18°C и нормален притисок, така што концентрацијата на молекулите $n_0 = 2,5 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$.

Решение:

- $I_{\text{sat}} = j_{\text{sat}} A$, ако со N_0 го означиме бројот јони што се создаваат во единица време и единица волумен ќе се добие:

$$I_{\text{sat}} = N_0 e A d \text{ следува } N_0 = \frac{I_{\text{sat}}}{e A d} = \frac{10^{-7}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100 \cdot 10^{-4} \cdot 0,05} = 1,25 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

- Според (9.19) $I_{\text{sat}} = \beta n_0 e A d$, а бидејќи $\beta n_0 = N_0$, за коефициентот β се

добива:
$$\beta = \frac{N_0}{n_0} = \frac{1,25 \cdot 10^{15}}{2,5 \cdot 10^{25}}, \beta = 5 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

9.3. САМОСТОЈНО ПРАЗНЕЊЕ. НЕКОИ ВИДОВИ САМОСТОЈНО ПРАЗНЕЊЕ

9.3.1. Судирна јонизација. Електронска лавина

Како што се гледа од графикот на сликата 9.6, при напони поголеми од V_3 струјата во комората нагло расте. Тогаш доаѓа до нагол скок на концентрацијата на јоните и електроните. Причина за тоа е појавата на **судирна јонизација**.

Објаснивме дека за да се јонизира еден атом или молекул, тој треба да добие повисока или еднаква енергија од енергијата на јонизација W_j која според табелата 9.1 зависи од природата на гасот. Така, ако кинетичката енергија на една честичка што се судира со некој атом ја надминува енергијата на јонизацијата, тогаш при нееластичен судир, можна е негова јонизација. При високи вредности на електричното поле, електроните и јоните што се наоѓаат во тој простор се забрзуваат од него и добиваат кинетичка енергија еднаква на работата W што ја вршат електростатските сили на полето E , под чие дејство тие го изминуваат слободниот пат (λ). За електронот таа енергија ќе биде еднаква на:

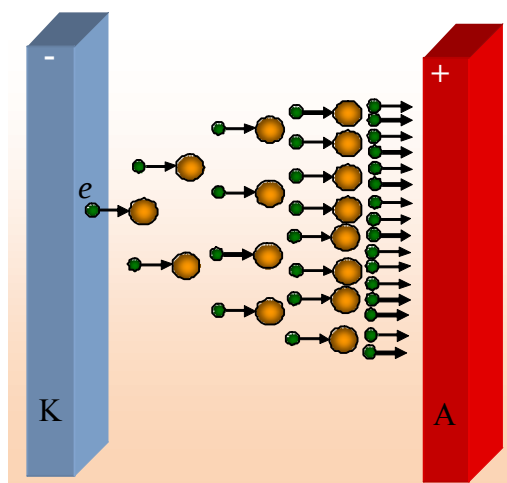
$$E_k = W = F\lambda = eE\lambda \quad (9.20)$$

Овде λ е средниот слободен пат на електроните.

Во процесот на судирната јонизација, се забрзуваат и електроните и јоните. Меѓутоа, електроните имаат многу поголем среден слободен пат, па по неговата должина повеќе се забрзуваат отколку јоните. Тоа е првата причина поради којашто **електроните и играат многу позначјана улога при судирната јонизација од јоните**. Втората причина лежи во следново: при судир со неутрален атом или молекул, за да може да дојде до нарушување на атомската градба, судирот мора да биде нееластичен. Имено, според законот за запазување на импулсот, при нееластичен судир само дел од кинетичката енергија може да се претвори во внатрешна енергија на атомот. Понатаму, теоријата на ненеластичните судири покажува дека, колку е помала масата на јонизирачката честичка од масата на атомот или молекулот со кој се судира, толку е поголем делот на кинетичката енергија што може да се претвори во внатрешна енергија и да се потроши како енергија на јонизација. Поради тоа електронот како јонизатор на неутралните атоми од еден гас е два пати поефективен од позитивниот јон. Понатаму, при судирната јонизација во гас кој е под надворешно електрично поле со доволно голема јачина, во гасот се создава лавина на електрони (јони)(сл. 9.9).

Еден од првите научници кој се занимавал со теоријата на самостојното празнење бил Таунсенд (John Sealy Edward Townsend, 1868-1957). Тој прв го објаснил создавањето на електронската лавина која настанува при судир на електрони со неутрални атоми или молекули. Тука, зборуваме за **електронска лавина**, бидејќи електроните се основните честички кои ја предизвикуваат.

Нека претпоставиме дека под влијание на некој надворешен јонизатор, на пример космичко зрачење, во комората се нашол еден електрон. Тој на својата должина на слободниот пат во електричното поле се движи забрзано и пред судирот ќе има некоја кинетичка енергија. Ако оваа енергија е поголема или еднаква на енергијата на јонизација, тогаш при судир со атомот ќе дојде до негова јонизација, и сега покрај јонот, и електронот -проектил, ќе се јави

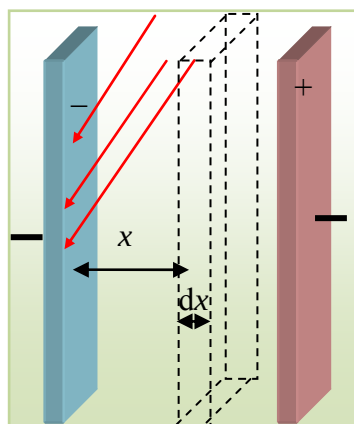


Сл. 9.9 Лавинообразно размножување на јоните и електроните во судирна јонизација со неутралните атоми од гасот.

уште еден електрон. Електроните се движат кон анодата, а јонот кон катодата. Така по овој акт на судирна јонизација бојот на електроните станува два. Сега овие два електрона во силното електрично поле се забрзуваат и ја зголемуваат својата кинетичка енергија, така што при идните судири се јавуваат 4 електрони. По третиот акт на јонизација, бројот на електроните се зголемува на 8, по четвртиот на 16 и.т.н. На тој начин бројот на електроните и јоните како се доближуваме до анодата лавинообразно расте.

Добивањето на електронската лавина може да биде опишано и со соодветен квантитативен закон.

Следејќи ја теоријата на Таунсенд ќе воведеме една физичка величина која се нарекува **коэффициент на волуменска јонизација** (α_0). Тој претставува број парови јон-електрони создадени од еден електрон на единица должина пат. Бидејќи енергијата на електронот на ист слободен пат е толку поголема колку што е поголема јачината на електричното поле во гасот, тогаш и овој коефициент α_0 зависи од јачината на електричното поле. Коефициентот α_0 исто така, поради тоа што зависи од средниот слободен пат на електроните, зависи и од притисокот на гасот.



Сл. 9.10

Да разгледаме еден слој од гас со дебелина dx , поставен меѓу две рамнински електроди на растојание x од катодата (сл. 9.10). На должина dx еден електрон ќе создаде $\alpha_0 dx$ парови електрон-јони. Ако во овој слој не влегува само еден, туку N електрони, тогаш зголемувањето на бројот електрони по должината на патот dx ќе биде:

$$dN = N\alpha_0 dx \quad (9.21)$$

Оттука

$$\frac{dN}{N} = \alpha_0 dx$$

Ако при $x=0$ се земе дека бројот на јоните е N_0 , кој одговара на оној број јони кои се добиени од надворешен јонизатор, тогаш интегрирање на ова равенство во граници: при $x=0$, $N=N_0$, а при $x=x$, $N=N$, се добива:

$$N = N_0 e^{\alpha_0 x} \quad (9.22)$$

Ова релација го дава бројот на јони на некое растојание x , за да се добие вкупниот број јони по целиот пат помеѓу анодата и катодата, треба за x да се земе растојанието меѓу електродите, d :

$$N_a = N_0 e^{\alpha_0 d} . \quad (9.23)$$

Овде N_a е бројот на јоните што пристигнуваат на електродата.

Од експоненцијалниот закон може лесно да се заклучи дека крајниот број на јони, N_a , може да биде и повеќе редови на големина поголем од почетниот број јони N_0 .

Пример

На еден метар се создаваат 300 парови јон-електрон и ако при тоа растојанието помеѓу анодата и катодата е $d = 3$ cm, колкав ќе биде односот помеѓу пристигнатите и почетните позитивни јони добиени од надворешниот јонизатор?

Решение

$$\frac{N_a}{N_0} = e^{300 \cdot 3 \cdot 10^{-2}} \approx e^9 \approx 10^4$$

Сепак, појавата електронска лавина во гасот, сè уште не претставува самостојно празнење. Ако во релацијата (9.23) за N_0 се стави да е еднакво на нула, тогаш $N_a = 0$, и нема да има празнење. Тоа значи при исклучување на надворешен јонизатор, празнење нема да има.

За празнењето да биде самостојно, потребно е на некој начин да се обезбеди постојано создавање електрони, за да може лавината сама од себе да се поддржува, т.е. да опстојува **самостојното празнење**.

Такви процеси има неколку. Понекогаш тие се случуваат истовремено, а понекогаш еден од нив има доминантна улога, сето тоа зависи од притисокот на гасот, од неговата температура како и од јачината на електричното поле. Ќе наброиме некои најважни од нив:

Термоелектронска емисија се случува тогаш кога катодата се наоѓа на висока температура. Овој процес е одговорен за самостојното празнење познато како електричен лак.

Секундарна електронска емисија од катодата се јавува во тој случај, кога кинетичката енергија на позитивните јони кои упаѓаат на катодата имаат доволно голема енергија да избиваат од катодата електрони. Тој процес е одговорен за самостојното празнење познато како тлеечко празнење.

Термојонизација на гасот настанува тогаш кога кинетичката енергија на молекулите на гасот ќе стане поголема од енергијата на јонизација:

$$\frac{mv^2}{2} > W_j \quad (9.24)$$

Овој вид создавање на јони бара многу висока температура на гасот. Да земеме дека средната кинетичка енергија на гасот е пропорционална со производот kT , каде што k е Болцмановата константа, па ако се земе предвид дека енергија на јонизација е од ред на големина на 10 eV, тогаш

$$T > \frac{W_j}{k} = \frac{10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} \approx 10^5 \text{ K}$$

Фофојонизација на гасот настанува под влијание на краткотраново ултравиолетово или рендгенско зрачење. Молекулот на гас кој ќе прими одреден квант на зрачење кој има енергијата поголема од енергијата на јонизација, тој може да предизвика јонизација на молекулот.

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

1. Кои се носители на струјата при празнењето низ гасови? Кои од носителите играат поголема улога при процесот на судирна јонизација?
2. Објаснете зошто се електроните подобри јонизатори од јоните?

Решение:

Објаснението на фактот дека електроните се подобри јонизатори од јоните лежи во теоријата на судирите.

Судирот на електронот (а исто така и јонот) со молекулот може да биде еластичен и нееластичен.

Ако при судирот на молекулот не може да му биде додадена енергија доволна за тој од основна енергетска состојба да се возбуди во повисока, сумарната кинетичка енергија на честичите кои учествуваат во процесот на судрувањето, останува без промени па судирот е еластичен.

Нека претпоставиме дека честичата проектил (јон или електрон) со маса m_1 и брзина v_{01} удира во неподвижна честича, на пример атом со маса m_2 . Брзината на атомот е значи $v_{02}=0$. За централен судир треба да важат законите за запазување на енергијата и импулсот на честичите:

$$\begin{aligned} \frac{m_1 v_{01}^2}{2} &= \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \\ m_1 v_{01} &= m_1 v_1 + m_2 v_2 \end{aligned} \quad (1)$$

каде што v_1 и v_2 се брзини на честичите по судирот. Со решавање на системот равенки даден со (1) може да се добијат брзините v_1 и v_2 . За v_2 се добива:

$$v_2 = \frac{2m_1 v_{01}}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

Енергија што би му се предала на атомот е тогаш:

$$\frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_{01}^2}{2} \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} \quad (3)$$

Ако честица-проектил е електронот $m_1 \ll m_2$, па овој израз може да се запише како

$$\frac{m_1 v_{01}^2}{2} \frac{4m_1}{m_2} = E_{k1} \cdot \frac{4m_1}{m_2} \quad (4)$$

каде што E_{k1} е кинетичка енергија на проектилот.

Ако проектилот е електрон, со оглед на $m_1 \ll m_2$, каде што m_2 е маса на дадениот молекул или атом, се гледа дека при ваквиот судир само мал дел од енергијата се предава на атомот. Лесниот електрон “ке отскокне” од масивниот молекул, при што неговата енергија практично нема да се промени.

При доволно голема енергија на честицата -проектил (електрон или јон) молекулот може да се возбуди или јонизира. Во тој случај вкупната кинетичка енергија на честицата не се запазува, дел од енергијата се “троши” на возбудување или јонизација, т.е на зголемување на внатрешната енергија на молекулот. Ваквиот судир го викаме нееластичен судир од прв ред.

Можно е молекулот кој се нашол во возбудена состојба при судир со друга честица (електрон, јон или друг неутрален молекул) да премине во основната енергетска состојба и притоа својата енергија да ја предаде на електронот, не зрачејќи енергија. Во тој случај вкупната кинетичка енергија по судирот ќе биде поголема од таа пред судирот. Таквите судири се викаат нееластични судири од втор ред. Ваков судир се среќава обично кога молекулот се наоѓа во метастабилна состојба. Тоа е состојба при која молекулот се задржува во возбудена состојба подолго (на пр. 10^{-3} s) отколку вообичаено време на задржување во возбудена состојба (10^{-8} s).

При нееластичен судир од прв ред равенките на запазување ја имаат следнава форма :

$$\frac{m_1 v_{01}^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \Delta E_{vn} \quad (5)$$

$$m_1 v_{01} = m_1 v_1 + m_2 v_2$$

каде што ΔE_{vn} е зголемувањето на внатрешната енергија на молекулот, кое одговара на енергијата потребна молекулот да премине од невозбудена во возбудена состојба.

Ако од системот на двете равенки (5) се елиминира v_1 ќе се добие:

$$\Delta E_{vn} = m_2 v_{01} v_2 - \frac{m_1 + m_2}{m_1} \frac{m_2 v_2^2}{2} \quad (6)$$

При една иста врзина на честицата-проектил, ΔE_{vn} зависи од брзината v_2 со која се движи честицата по судирот.

Да ја побараме максималната вредност на ΔE_{vn} . За таа цел треба првиот извод од $\Delta E_{\text{vn}}=f(v_2)$ да го изедначиме со нула:

$$\frac{d(\Delta E_{\text{vn}})}{dv_2} = m_2 v_{01} - \frac{m_1 + m_2}{m_1} m_2 v_2 = 0$$

Од каде што

$$v_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_{01} = 0 \quad (7)$$

Ако оваа вредност се внесе во изразот (6) за ΔE_{vn} се добива:

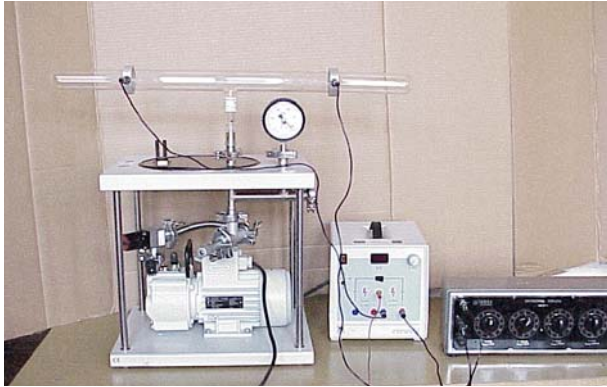
$$\Delta E_{\text{vn max}} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{m_1 v_{01}^2}{2} \quad (8)$$

Ако честицата - проектил е со многу помала маса од масата на атомот (молекулот), ќе биде $\frac{m_1}{m_2} \ll 1$; $\frac{m_2}{m_1 + m_2} \rightarrow 1$ и речиси целата енергија на проектилот може да премине во внатрешна енергија, поради што многу полесно може да дојде до јонизација. Така се објаснува значително поголемата улога на електроните од улогата на јоните при процесот на судирната јонизација.

9.3.2. Тлеечко празнење

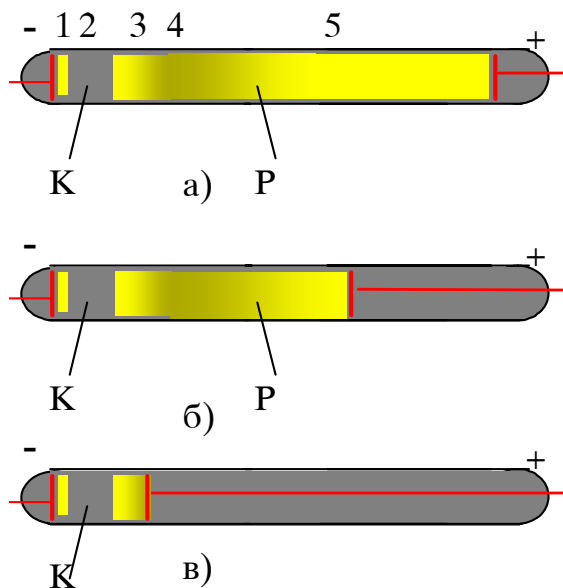
Еден од најважните процеси кој овозможува постојаност на самостојното празнење е секундарната емисија на електрони под дејство на бомбардирање на катодата со позитивни јони. Настанува тогаш кога позитивните јони имаат доволно голема енергија за да можат да избијат од катодата електрони, па на тој начин се добиваат дополнителни извори на јони, неопходни процесот да тече континуирано. Овој вид надополнување на бројот на јоните се среќава кај празнењето кое се нарекува **тлеечко**.

Тлеечкото празнење може да се набљудува во една стаклена цевка со должина 30-50 cm која е поврзана со извор на постојан висок напон од неколку стотици волти (Сл. 9.11).



Сл. 9.11. Апаратура за демонстрација на тлеечкото празнење.

од катодата кон анодата, а при понатамошно снижување на притисокот гајтанот се здобува и постепено го исполнува сиот пресек на цевката, а притоа, светењето во близината на катодата ослабнува.



Сл. 9.12

Деловите (1),(2),(3) и (4) се нарекуваат катодни делови на празнењето.

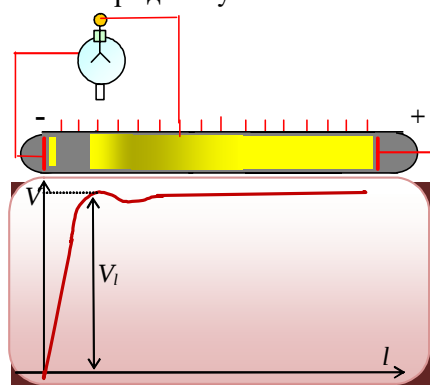
При атмосферски притисок, иако меѓу електродите има висок напон, до празнење нема да дојде, па цевката си останува темна. Ако цевката потоа се евакуира со постепено намалување на притисокот, тогаш во еден момент во цевката ќе дојде до светење (празнење), прво ќе се појави светлина во вид на искривен гајтан што оди

При притисок од ред на големина 13-1,3 Pa (0,1-0,01 mmHg) празнењето ќе добие изглед како оној што е прикажан на сликата 9.12a. Тука разликуваме повеќе делови:

- (1) прво катодно светење; зад кое се наоѓа;
- (2) темен простор кој се нарекува **кајоден ѓемен ѓросѓор**, означен и со К;
- (3) светол слој т.н. тлеечко светење кое има остра граница кон катодата, а постепено исчезнува кон анодата;
- (4) Фарадеев темен простор;
- (5) позитивен столб, означен и со Р.

Од особено значење за процесот на празнењето се катодниот темен простор и тлеечко светење. Во нив настануваат најважните процеси кои подржуваат празнењето да остане самостојно. Имено, ако анодата во цевката е подвижна и можеме да ја доближиме до катодата (слика 9.12б, и в), тогаш сите катодни делови остануваат непроменети, а се скратува само позитивниот столб. При понатамошното намалување на должината на столбот во кој настанува празнењето, почнува да се скратува вториот катоден простор, па второто катодно светење, и кога анодата ќе се најде во катодниот темен простор, тогаш светењето сосема престанува. Меѓутоа, празнењето продолжува и понатаму. Празнењето сосема ќе исчезне кога анодата ќе се најде зад границата од првиот катоден темен простор и тлеечкото светење.

Објаснувањето на овој феномен не е едноставно. Некоја слика ни дава функцијата на распределбата на потенцијалот по должината на цевката. Таа функција може да се определи ако во цевката се постават дополнителни сонди-електроди, распоредени на еднакви растојанија по должината на цевката и се мери напонот помеѓу таквата сонда и катодата.



Сл.9.13

Мерењето на зависноста на напонот од растојанието од катодата се прави или со волтметри со голем внатрешен отпор, или со прецизни електрометри. Така добиената крива е прикажана на сликата 9.13 долу. Од кривата се гледа дека речиси целиот пад на напонот се случува во првиот катоден темен простор К. Овој пад се вика **катоден пад на потенцијалот**.

Опитите покажуваат дека ако јачината на струјата при празнењето не е многу голема, тогаш и падот на напонот не зависи од струјата. Тоа е т.н. **нормален катоден пад на потенцијалот**. Промената на јачината на струјата само го менува интензитетот на светењето на

површината на катодата. Светењето се засилува со порастот на струјата. Кога јачината на струјата ќе ја постигне вредноста при која светењето ќе ја покрие целата површина на катодата, тогаш катодниот пад на напонот започнува да се зголемува со



Тлеечко празнење во лампа од криптон.



Тињалица (тлеечка лампа)

порастот на струјата (**аномален пад на потенцијалот**).

Најсуштинско за разбирањето на празнењето низ гасовите во овој случај е тоа што големината на нормалниот пад на катодниот потенцијал зависи од природата на гасот и од природата на катодата. Притоа, опитите

укажуваат дека катодниот пад на потенцијалот е пропорционален со излезната работа на металот од кој е направена катодата (ако се замени катодата со друга, ќе настане промена).

Механизмот на празнењето може поедноставено вака да се прикаже. Позитивните јони, кои се создаваат со судир со неутрални атоми на гасот со забрзаните електрони (тоа станува во тлеечкото светење и во делот што се вика позитивен столб) се движат кон катодата, па поминувајќи го делот со катодниот пад на потенцијалот тие добиваат значителна кинетичка енергија. Така забрзаните јони ја бомбардираат катодата и од катодата избиваат електрони. Избиените електрони во областа на катодниот пад на потенцијалот многу се забрзуваат, така што имаат доволно голема кинетичка енергија за да можат да вршат јонизација врз неутрални молекули или атоми на гасот. Како резултат на јонизацијата сега се јавуваат нови позитивни јони, кои се движат кон катодата, па во областа на катодниот пад на потенцијалот добиваат значителна енергија. Кога ќе паднат на катодата тие предизвикаат избивање на електрони и така процесот трае постојано. На тој начин, основните процеси кои го подржуваат тлеечкото празнење се судирна јонизација и секундарна емисија на електрони.

Постоењето на катодниот пад на потенцијалот се објаснува на следниот начин. Од катодата избиењите електрони не се судираат со неутралните атоми веднаш, туку на некое растојание од катодата. Ширината на областа со катодниот пад на потенцијалот одговара приближно на средниот слободен пад на електроните. Оваа ширина се зголемува со намалувањето на притисокот на гасот.

Концентрацијата на јоните и концентрацијата на електроните во различни делови на цевката не е иста. Ние веќе укажувавме за такви можности при празнењето низ гасови (види поглавје 9.2).

Бидејќи брзината на јоните е значително помала (поради нивната поголема маса), во близина на катодата концентрацијата на јоните е значително поголема отколку на електроните. Токму затоа во близина на катодата се создава голем просторен позитивен полнеж кој е

и причина на создавањето на катодниот пад на потенцијалот. Но, во областа на позитивниот столб, концентрацијата на позитивните јони и електрони е речиси еднаква, и тука не постои некаков просторен полнеж. Благодарение на големата концентрација на полнежи, позитивниот столб има голема спроводливост, па затоа е падот на потенцијалот во тој дел многу мал.

Бидејќи концентрацијата на јоните и на електроните во оваа област е скоро еднаква, постојат многу добри услови за рекомбинација на атомите. Со тоа се објаснува и светењето



на областа на позитивниот столб.

Гледаме дека катодниот пад на потенцијалот е неопходен за да тече процесот на тлеечко празнење.

Тлеечкото празнење денес наоѓа широка примена за конструкција на различни цевки со гасно празнење. Така постојат живини лампи, кај кои празнењето се прави низ парите на жива, а притоа со нанесување на различни флуоресцентни супстанции на



Тенок слој од титан оксинитрид нанесен со катодно распршување во фирмата Плазма од Скопје

сидовите на цевката може да се добијат светилки со различни бои. Таквите цевки се користат како рекламни светилки, различни видови украсни светилки и др.

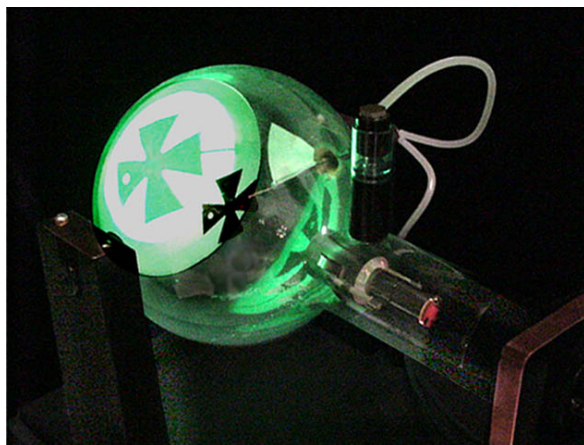
Користејќи го фактот дека катодниот пад на потенцијалот зависи од материјалот на катодата, може да се конструираат и цевки со мал напон на палење. Таква е, на пример, неонската тлеечка светилка. Таа се состои од две железни електроди прекриени со слој од бариум. Поради малата излезна работа на бариумот, катодниот пад на потенцијалот во овој случај изнесува само 70 V, па затоа ваквата светилка се пали и при напон од градска мрежа. Исто така вакви светилки се користат и како сигнални уреди во различни апарати.

Тлеечко празнење се користи и како катодно-распрснувачки метод за добивање на тенки филмови од супстанција од која се прави катодата. Кога катодата се бомбардира со многу забрзаните позитивни јони тие може да исфрлат цели атоми од супстанцијата на катодата. Избиените атоми се таложат на даден супстрат кој е поставен пред анодата и така се добиваат тенки филмови од металот од којшто е направена катодата.

9.3.3. Катодни зраци. Канални зраци

Покажавме дека при тлеечкото празнење од катодата излетуваат голем број електрони, кои потекнуваат од катодата поради нејзиното бомбардирање со забрзаните позитивни јони. Овие електрони во катодниот темен простор, практично не се судираат со неутралните атоми на гасот, па значи празнењето во овој дел се должи само на движењето на електроните.

Електронските снопови во гасови под многу снижен притисок (популарно наречен вакуум) историски биле откриени од Крукс (Crooks William, 1832-1919) и добиле назив **катодни зраци**.



Сл. 9.14

Кога притисокот на гасот се снижи до вредности од 1- 2 Pa, во зависност од димензиите на цевката, тогаш катодниот темен простор ќе ја опфати целата цевка, па се добива цевка со катодни зраци. Основните особини на овие зраци можат да се покажат и експериментално.

Со помош на цевката што беше искористена понапред во експериментот 9.11, при понатамошното снижување на притисокот (околу 1 Pa) се добиваат катодните зраци. Темниот катоден простор се проширува, и се губи позитивниот столб. Гасот во внатрешноста не свети, но светат стаклениите сидови со зеленкаста боја. Тоа е знак дека катодните зраци предизвикуваат флуоресценција на стаклото.

Својствата на катодните зраци се демонстрираат со помош на цевки во коишто притисокот е снижен до таа мера, што меѓу електродите се создаваат катодните зраци. Електродите на таквите цевки се поврзуваат со извори на висок напон (до 10 kV) или со секундарот на индукторот .

Подолу се набројани четирите основни својства на катодните зраци.

а) Катодните зраци се простираат праволиниски. Тоа се демонстрира со помош на цевка во којашто има катодни зраци што удираат во некој предмет (види ја сликата 9.14). На стаклениот сид

предметот фрла сенка, со што се покажува дека катодните зраци се движат слично како и светлинските зраци - праволиниски.

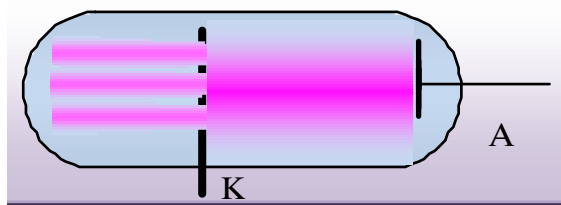
б) Катодните зраци предизвикуваат флуоросценција. Стаклените сидови светат, кога на нив ќе паднат катодните зраци.

в) Катодните зраци имаат енергија. Тие може да вртат вртелешка којашто е поставена на нивниот пат, удирајќи во нејзините перки. Значи, катодните зраци покажуваат и механичко дејство.

г) Катодните зраци се отклонуваат во магнетно поле.

Отклонувањето е такво што важи правилото на трите прсти на десната рака (показалецот-насока на магнетното поле, средниот прст-насока на катодните зраци, а палецот е насоката на отклонувањето - силата.) Ако нормално на снопот се постави магнетно поле, се вметне потковичест магнет, ќе дојде до отклонување на снопот. Со помош на ваквото отклонување на катодните зраци, се определува и нивниот негативен полнеж односно се покажува дека се тие сноп од електрони.

Тлеечкиот процес на празнење е проследен со емисија на електрони од катодата, кои се добиени од удирањето на забрзаните позитивни јони во неа. Ако катодата не е компактна, туку има отвори, тогаш дел од позитивните јони што се движат кон катодата ќе поминува во просторот зад неа во вид на зраци познати како **канални зраци**.



Сл.9.15

Каналните зраци се добиваат со помош на високоевакуирана цевка во којашто катодата е пресечена со канални отвори. Зад катодата се набљудуваат канални зраци (слика 9.15). Таму гасот свети поради тоа што

снопот позитивни јони при сударите ги возбужда неутралните молекули, кои враќајќи се од возбуждена во основна состојба, емитираат светлина која е карактеристични за дадениот гас, па затоа гасот свети. И тие се отклонуваат во електрично и во магнетно поле, па според тоа, како се отклонуваат, може да се суди дека се позитивно наелектризиран честички. Често се користат во физиката како сноп позитивно наелектризиран честички за чисто научни цели.

Постоењето на катодните и каналните зраци се експериментални факти кои ја потврдуваат Таунсендовата теорија за настанувањето и одржувањето на тлеечкото празнење.

9.3.4. Искра. Молња

Ако постепено се зголемува јачината на полето меѓу две електроди кои се наоѓаат во воздух, меѓу електродите може да прескокне **искра** дури и

при атмосферски притисок,. Тоа е многу тенок светол канал кој на многу места е разгранет во фрактална геометрија(Сл. 9.16)

Во еден гас можеда се јави електрична искра ако полето E достигне



Сл.9.16. Електрична искра

некоја определена големина E_{kr} (критична јачина на поле), која зависи од природата на гасот и од неговата состојба. За воздух при нормални услови $E_{kr} \approx 3 \cdot 10^6$ V/m.

Величината E_{kr} се зголемува со растење на притисокот. Односот меѓу јачината на критичното поле и притисокот на гасот е скоро константна во поширока област на притисокот:

$$\frac{E_{kr}}{p} \approx \text{const} \quad (9.25)$$

Овој експериментален факт е познат како Пашенов закон (Paschen Friedrich, 1865-1947). Пашеновиот закон е во согласност со теоријата на Таунсенд и дава можности да се определи јачината на електричното поле на пробив при некој притисок на гас, ако е позната константата за дадениот гас.

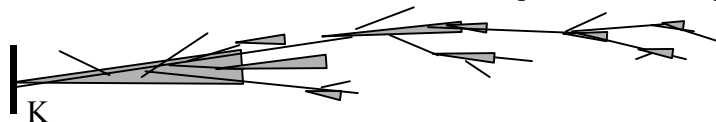
На принципот на искра е граден еден вид на високоволтен волтметар. Кај него растојанието меѓу електродите може со голема прецизност да се менува. Ако е познато E_{kr} за тој гас, тогаш може да се мери потенцијалната разлика, преку искртата која ќе се јави во моментот кога полето ќе ја достигне критична вредност (E_{kr}).

Напонот на пробив E_{kr} , се снижува ако постои надворешен јонизатор.

Прво се мислело дека Таунсендовата теорија ќе биде наплно применлива за објаснувањето на појавата искра. Меѓутоа, набргу се покажало дека искрата не може да биде последица на движење на позитивните јони, бидејќи таа е многу краткотрајна, ред големина 10^{-7} s, па и помалку. Ако се претпостави дека искрата е последица на движењето на позитивните јони, тогаш нејзиното времетраење ќе беше многу подолго (10^{-4} до 10^{-5} s).

Создавањето на искрата се објаснува со формирање на т.н. **стримери** (Сл. 9.17). Тоа се мали тесни канали од јонизиран гас што се јавуваат како претходница на главниот искров пробив. Стримерите

претставуваат еден вид мостови за главниот искров канал. Причина за создавањето на стримерите главно е фотојонизација. Фотоните-јонизатори во стримерот се движат значително побрзо и затоа секој стример претходи на создавање на лавината електрони, односно јони.



Сл. 9.17

Искровиот канал, всушност, претставува лавина на електрони кои ослободуваат голема енергија за многу кратко време. Тоа предизвикува загревање на гасот до температури до 10^4 К што доведува до негово светење. Брзото загревање на гасот доведува до зголемување на неговиот притисок и до појава на ударни бранови, со што се и објаснуваат звучните ефекти при искров пробив.



Сл.9.19

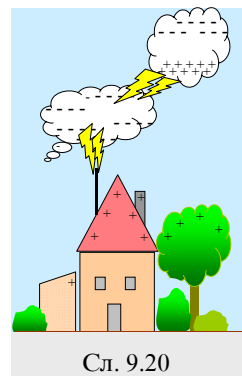
Пример на гигантска искра е **молњата**

(сл. 9.19). Со испитувања на молњата се занимавале Франклин (Benjamik Franklin, 1706-1790) и Ломоносов (Ломоносов Михаил Васи-

левич, 1701-1765). Процесите на атмосферското празнење се предмет на изучување на геофизиката. Затоа нема овде да навлегуваме во детали. Ќе се задоволиме само со основните разјаснувања на појавата.

Причина за појава на силните електрични полиња за време на луѓите се електричните полнежи што се наоѓаат во облаците во кои има и позитивни и негативни полнежи, распоредени во разните делови од облакот. Најчесто негативните полнежи на облакот се наоѓаат на неговата страна кон Земјата, а позитивните се на спротивната страна, иако е можна и поинаква покомплицирана распределба на полнежите.

Кога јачината на електричното поле во атмосферата е доволно голема, се јавува молња. Таа се јавува или помеѓу облаците, или помеѓу облак и Земјата. Јачината на струјата во молњата е многу голема и достигнува и од 10 000 до 500 000 А, додека напонот меѓу облакот и Земјата е од редот големина 10^8 до 10^9 V. Времетраењето на молњата е од редот големина на микросекунди. Затоа е и полнежот пренесен со молњата мал, од ред на големина од 0,1 до 200 C.



Многу често молњата претставува редица од искрови пробиви кои следат еден зад друг. Таквите празнења може да ги има повеќе, и до повеќе десетици, а вкупното траење на таквата молња да биде и од ред на големина на 1 s. Кога каналот ќе ја допре Земјата по патот кој е пробиеен од него, тогаш почнуваат да се движат огромен број наелектризирани честичи по главниот канал на молњата од Земјата кон каналот и тоа со голема брзина (ред на големина од 10^7 до 10^8 m/s). Притоа доаѓа до големо загревање на воздухот по должината на долж каналот што и предизвикува звучен ударен бран - грмотевица.

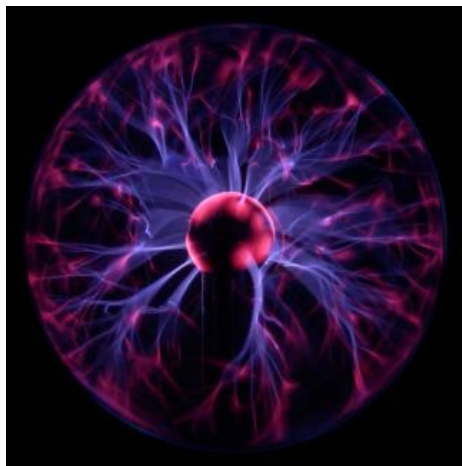
На целата Земја се случуваат истовремено околу 1800 луњи кои предизвикуваат околу 100 молњи во една секунда. Дел од нив паѓаат на Земјата и предизвикуваат пожари, струјни удари врз луѓе, или пречки во пренос на различни видови комуникациски сигнали. Затоа уште од времето на Франклин и Ломоносов биле измислени громобраните, кои поправилно би требало да се викаат молњоодведувачи или гроом-одведувачи. Тие претставуваат заострени метални стапови поставени врз објектот (зградата) што се заштитува. Статистиката покажува дека заштитата на громобранот се однесува на предмети оддалечени на растојанија отприлика два пати поголеми од висината на громобранот. Дејството му базира на примципот на дејство на шилец ("електростатски ветер"). Некои објаснувања кажуваат дека околу громобранот никнува корона празнење, па воздухот околу шилецот е многу јонизиран (за корона како вид празнење ќе стане збор во следното поглавје). Тоа значи дека тој дел од атмосферата е многу добар спроводник, па јачината на полето E е тука помала (како во секој добар спроводник) што ја намалува веројаноста за појава на молња. Сепак, при многу силни празнења молњата може да удри во громобранот, но празнењето тогаш се одведува со спроводникот во Земјата, не оштетувајќи ја зградата на која е поставен громобранот.

Стримерната теорија за искрата и молњата сè уште е предмет на испитувања на голем број научници, физичари кои се занимаваат со физикта на плазма, како и на геофизичарите.

9.3.5. Корона празнење

Корона или тлеечкото празнење може да се јави при силни нехомогени полиња и во услови на атмосферски притисок. За да се добие во лабораториски услови треба електродите да имаат многу различни површини, едната да е шилец (кој има многу мала површина), а другата околна површина со многу голема плоштина. Исто така, може едната електрода да биде мала сфера а другата да е поголема сфера, концентрична на првата (слика 9.21). Треба да се напомене дека во случај да не постои

надворешната сфера, тогаш сите околни предмети може да ја претставуваат другата електрода. Полето е најсилно во близината на



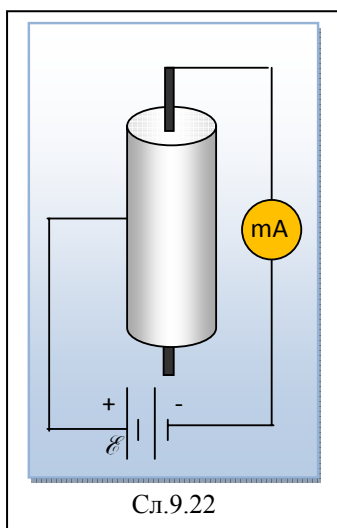
Сл. 9.21. Корона празнење помеѓу две сферни, концентрични електроди

малата сферна електрода, и во услови кога тоа поле стане од редот големина $3 \cdot 10^6$ V/m (при атмосферски притисок и нормални температури) меѓу двете електроди ќе дојде до течење струја предизвикано од корона празнењето.

Овој вид празнење ќе се јави и ако се донесе променлив напон.

Зголемувањето на напонот меѓу електродите ја зголемува широчината на светлечката корона. Во зависност од знакот на електродата на која се јавува корона празнење

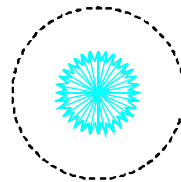
разликуваме негативно и позитивно корона празнење.



Сл.9.22

Процесите во корона се сведуваат главно на следново: ако централниот спроводник (малата сфера на слика 9.21 или жицата во оската на цилиндарот на слика 9.22) е негативен и еднаков на напонот на пробив, тогаш на неговата површината изникнуваат електронски лавини. Тие се движат од централниот спроводник кон периферниот (слика 9.23). Јачината на полето на некое растојание многу ќе се намали, па електронската лавина ќе ја снеса. Растојанието до кое ќе дојдат електронските лавини не е еднакво со растојанието меѓу електродите, што значи пробивот не е целосен.

Корона празнењето се појавува на какви и да било спроводници на кои има зашилени делови, како дрва, заострени предмети, спроводни жици и сл. За да се појави корона празнењето всушност најбитно е да постои силно нехомогено поле. Ќе видиме подоцна, дека ваков вид на празнење се



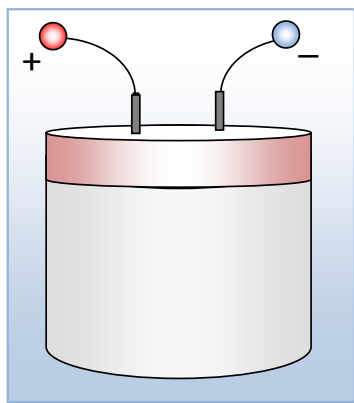
Сл.9.23

набљудува кај секундарот на Теслиниот трансформатор, којшто претставува извор на многу висок напон и струја со многу висока фреквенција.

Корона празнењето е искористено кај електростатските филтри. Во принцип електростатски филтер е уред чија што шема е истата онаа од сликата 9.22. А дека нехомогеното поле може да ја расчисти атмосферата од разните видови прашинки или чад може да не убеди следниов експеримент.

Експеримент

Во просиран сад со добар затворач (слика 9.24) се внесува чад од цигара.



Сл. 9.24

Во садот се вметнати две електроди, поврзани со кондукторите на електростатската машина. Кога електростатската машина ќе проработи, набргу чадот од садот ќе го снеса.

Објаснувањето на опитот е следново: чадот од цигара се состои од воздух измешан со честички - продукти на согорувањето, чишто димензии се од редот на големина од 0,1 до 1 μm . Околу секоја од електродите се создава силно нехомогено електрично поле, па во тој простор доаѓа до јонизација на воздухот (корона празнење). Јоните, движејќи се

кон електродите се судруваат со честичките чад и ги електризираат. Така наелектризираните честички се движат кон електродите и на нив се таложат.



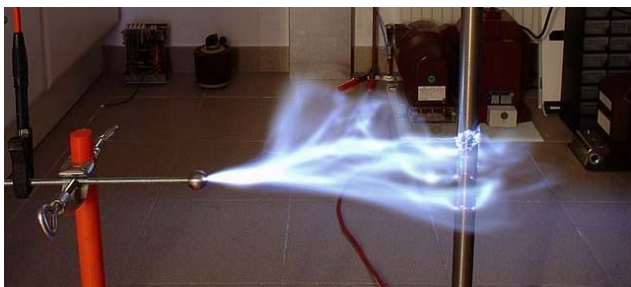
Сл. 9.25

Техничката изведба на електростатскиот филтер за индустриска намена се сведува на коронарно празнење помеѓу две електроди, меѓу кои постои многу висок напон (до 70 000 V). Ефикасноста на ваквите

електростатски филтри најубаво ја илустрира фотографијата на сликата 9.25. На фотографијата лево е дадена слика на град кога во фабричките оџаци функционира електростатски филтер. Сликата десно го дава истиот дел од градот, кога филтерот не функционира.

9.3.6. Електричен лак

Постои уште еден вид празнење којшто нашол голема примена. Тоа е **електричниот лак**. Се добива така што две електроди од јаглен под напон најпрво ќе се допрат, а потоа ќе се одвојат. Тогаш меѓу електродите ќе се појави силно светење, а и самите краеве светат со заслепувачка светлина. При допирањето на електродите потекнува многу силна струја која силно го загрева просторот околу допирот. Поради оваа струја на анодата доаѓа до стопување на местото на контактот (се формира дупче). Поради високата температура дошло до термичка јонизација на воздухот но и силна термоелектронска емисија на електрони од катодата. При одвојувањето се создадени услови за течење на силна струја при гасно празнење низ силно јонизираниот гас. Механизмот е искористен кај апаратите за заварување.

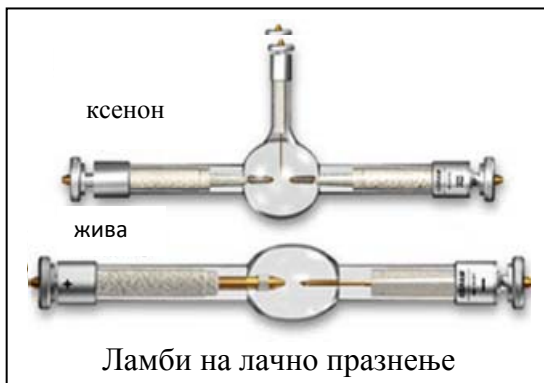


Сл. 9.26. Лачно празнење во атмосфера:
растојанието помеѓу електродите е околу 20 cm.

Место со највисока температура на електричниот лак е вдлабнатина што се образува на анодата и се нарекува кратер на лакот. Неговата температура при атмосферски притисок изнесува 4000°C , а при повисок притисок може да биде и многу повисока, на пример

при притисок 20 пати повисок од нормалниот, температурата е и до 7000°C , значи повисока од температурата на површината на Сонцето.

Која е основната причина за големата електропроводливост кај електричниот лак? Востановено е дека големата електропроводливост на лакот се поддржува со високата температура на негативната електрода и појавата термоелектронска емисија од неа. Покрај тоа поради високата температура која во лакот се развива овде голема улога игра и термичка јонизација.



Електричниот лак нашол примена за добивање висококвалитетен челик (печка од електричен лак), за осветление, како проектор и во научни цели како извор богат на ултравиолетовите зраци. Особено се значајни живините лачни лампи (т.н. кварцни лампи) кои се

користат во медицината како извор на ултравиолетово зрачење за стерилизација на инструменти и простории. Додека корона празнењето се јавуваше при многу висок напон, а струите беа слаби, лачното празнење се карактеризира со низок напон и многу јаки струи.

9.4. ПЛАЗМА

Плазмата претставува високојонизиран гас во којшто концентрациите на позитивните и негативните полнежи се еднакви, така таа како целина е неутрална. Во плазмата постојат и неутрални атоми. Постои високотемпературна плазма, која се создава при многу високи температури и плазма при гасен пробив, која се јавува при гасното празнење.

Плазмата се карактеризира со степенот на јонизација (α) кој е даден со односот меѓу бројот на јонизирани атоми и вкупниот број атоми во единица волумен на плазмата.

Во зависност од степенот на јонизацијата, разликуваме слабо јонизирана плазма (α е од редот големина на дел од процент), умерено јонизирана (α е од ред големина на неколку проценти) и високо јонизирана плазма (α е приближно 100%).

Кај плазмата при гасен пробив наелектризираните честички на плазмата во електрично поле имаат различна средна кинетичка енергија. Тоа кажува дека температурата на електроните T_e е различна од температурата на јоните T_j , при што $T_e > T_j$. Оваа нееднаква температура на честичките кои ја градат укажува на тоа дека овој вид плазма е нерамнотежна и неизотермичка. Губењето на бројот на честичките со рекомбинацијата, се надоместува преку судирната јонизација, предизвикана главно од електроните што се забрзуваат во електричното поле. Прекинувањето на надворешно електрично поле доведува до губење на плазмата.

Високотемпературна плазма, пак, е рамнотежна, изотермичка, т.е. при определена температура на гасот, губењето на наелектризираните честички се надополнува со термичка јонизација. Кај таквата плазма

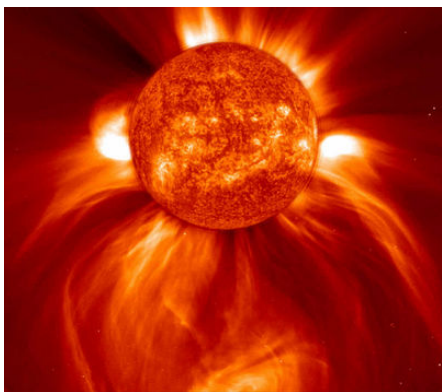
средните кинетички енергии на позитивните и негативните полнежи се еднакви. Во таква состојба се наоѓаат ѕвездите и Сонцето.

Плазмата ги има следниве основни својства:

- висок степен на јонизација на гасот (во услови на полна јонизација);
- просторниот полнеж во неа е еднаков на нула, не постои, бидејќи е бројот на позитивните и негативните полнежи кај неа еднаков;
- голема електропроводливост, при што и овде таа спроводливост главно се должи на електроните кои имаат многу поголема подвижност.
- плазмата свети;
- електроните во плазма-состојбата осцилираат со голема фреквенција $\approx 10^8$ Hz што предизвикува општи вибрации во плазмата.

Плазмата има и други физички својства што ја прави да биде специфична состојба на материјата, па поради тоа често се вика четврта агрегатна состојба на супстанцијата. Физика на плазмата, особено физика на високотемпературната плазма е од големо значење за астрофизиката, а и за истражувања поврзани со термојадрената фузија.

Нискотемпературната плазма се употребува кај гасните ласери, во различни термоелектронски уреди, плазмени ракети и други технички уреди.



99,999% од видливиот дел од Вселената се наоѓа во состојба на плазма.



Молњата е пример за плазма состојба на земјината површина. При празнењето протекува струја од 30 000 A при напон од 100 милиони волти. Се емитува светлина, радиобранови, UV зраци, X-зраци, па дури и гама зраци, и температура до 28 000 K.

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

1. Дали поминува електрична струја низ тела на птици што стојат на голите спроводници од високонапонските водови за електричната струја?

Одговор:

Бидејќи низ спроводниците тече струја со многу висок напон, во воздухот се создаваат услови на гасно празнење. Така, и низ птиците тече струја на гасното празнење, но таа струја е со многу мала јачина, така што птиците воопшто не ја чувствуваат.

2. Околу глава на патник во посебни природни услови (многу облачно време пред луѓа) се појавува светол ореол. Религиозните луѓе на таквите појави им давале разни објасненија, најчесто дека таквиот човек е светец. Што мислите, какво е објаснувањето на физиката?

Одговор:

Станува збор за корона празнење. Главата на човекот претставува електрода со висок напон околу која се создава нехомогено електрично поле, неопходен услов за создавање на корона.

3. На маса е поставена електростатска машина споена со двете топчиња со кои се овозможува нејзиното празнење. Ако се активира машината а растојанието меѓу топчињата на испразнувачот е такво што до искра не доаѓа, како би можеле да предизвикаме празнење меѓу топчињата без да го промениме растојанието меѓу топчињата?

Одговор:

Можно е да се предизвика празнење, ако меѓу топчињата се донесе некој спроводник (тоа може да биде метална жица) или пламен на свеќа.

4. Што мислите, зошто е опасно во време на луѓи да се стои во поле?

5. Зошто е опасно во време на луѓи да се пали оган. Пред десетина години во Берово гром усмрти луѓе што палеле оган. Можете ли да дадете објаснение?

6. Објаснете зошто во просторија со повеќе пушачи се намалува мирисот од чадот ако во собата се запалат свеќи.