

Л.13. Квантавыя ўласцівасці выпраменьвання

Змест:

- 1. Карпускулярна-хвалевы дуалізм**
- 2. Квантавая тэорыя святла**
- 3. Вонкавы фотаэфект**
- 4. Унутраны фотаэфект**
- 5. Прымяненне фотаэфекту**
- 6. Ціск святла**
- 7. Хімічнае і біялагічнае дзеянне святла**

Карпускулярна-хвалевы дуалізм

Пытанне аб прыродзе святла ўзнікла ўжо ў старажытнасці.

У сваіх трактатах “Оптыка” і “Катоптрыка” грэчаскі філосаф **Эўклід** (300г. да н.э.) разглядаў святло, як патак прамянёў, якія ідуць з вока і як бы абмацваюць прадмет, які разглядаецца.

Супрацьлеглы погляд на святло як маленькія злёпкі (“прывіды”), якія выпускаюць целы, што свецяцца, выказаў у сваёй паэме “Аб прыродзе рэчыва” **Лукрэцый**.

У XVII ст. французські філософ **Дэкарт** зрабіў першую спробу растлумачыць закон праламлення святла на аснове карпускулярнай тэорыі святла.

Гэта ідэя прывяла **Ньютана** да стварэння тэорыі выцякання, згодна якой святло складаецца з маленькіх светлавых часціц — **карпускул**, якія выпраменьваюцца цэлам і ляцяць з вялікай скорасцю.

Аднасова з карпускулярнай канцэпцыяй
Дэкарта – Ньютана ўзнікла і развівалася
хвалевая тэорыя Гука – Гюйгенса,
згодна якой святло – гэта працэс
распаўсюджвання падоўжаных
дэфармацый у матэрыяльным асяроддзі,
які пранізвае ўсе целы.

Такім чынам, у канцы XVII ст. узніклі і
існавалі незалежна адна ад адной дзве
тэорыі на прыроду святла –
карпускулярная і хвалевая.

Хвалевая тэорыя ўдасканальваецца
Маквелама і ствараецца электрамагнітная
тэорыя (1865г), якая дазволіла
растлумачыць шэраг аптычных з'яў
(інтэрферэнцыю, дыфракцыю,
палярызацыю) і атрымаць іх колькасныя
заканамернасці.

Але да канца XIX ст. накапілася шэраг
эксперыментальных фактаў, якія хвалевая
тэорыя святла растлумачыць не магла
(спектр абсалютна чорнага цела, фотаэфект і
інш.).

У пачатку ХХ ст. **М.Планк** раскрывае
прыроду цеплавога
выпраменьвання на аснове
ўяўленняў, што выпраменьванне
выпускаецца і паглынаецца цэламі
не непарыўна, а **асобнымі порцыямі**.

Затым **А.Эйнштэйн** на аснове тэорыі
Планка растлумачвае з'яву
вонкавага фотаэфекту.

Такім чынам, працы Максвела, Планка і
Эйнштэйна прывялі да сучасных
уяўленняў аб **дваістасці прыроды святла**
ці **карпускулярна-хвалевым дуалізме**.

Згодна **карпускулярна-хвалевага дуалізму**
ў адных выпадках **святло разглядаецца**
як хваля, у другіх – **як паток карпускул**.

Сутнасць адных аптычных з'яў
тлумачыцца **электрамагнітнай тэорыяй**,
другіх – **квантавай**.



Квантавая тэорыя святла

14 снежня 1900г. М.Планк
выступае з дакладам у
Берлінскім фізічным
таварыстве і прапаноўвае
сваю “рабочую гіпотэзу” –
целы выпраменьваюць
энергію асобнымі порцыямі -
дыскрэтна.

У сучасны момант гэтыя
асобныя порцыі называюць
квантамі святла ці фатонамі.



МАКС ПЛАНК

Так пачала нараджацца новая, **квантавая фізіка**, эксперыментальныя карані якой знаходзяцца ў XIX ст. (адкрыццё рэнтгенаўскіх і катодных прамянёў, радыеактыўнасці, цеплавога выпраменьвання, атамных спектраў, фотаэфекту, ціску святла і інш.).

Згодна тэорыі Планка **энергія кванта** выпраменьвання звязана з частотой

$$\varepsilon = h\nu,$$

дзе **$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с** – пастаянная Планка.

У механіцы ёсць велічыня, якая мае
размернасць “энергія · час” ($d = E \cdot t$).

Гэта велічыня называецца дзеяннем.

Таму пастаянную Планка называюць **квантам
дзеяння**.

Згодна тэорыі адноснасці $\varepsilon = mc^2$, адкуль
маса кванта (фатона) $m = \varepsilon/c^2 = h\nu/c^2$.

Імпульс фатона роўны $p = \varepsilon/c = h\nu/c$.

Такім чынам, гэтыя формулы даюць сувязь паміж характарыстыкамі карпускул (часціц) масай **m** і імпульсам **p** і характарыстыкай хвалі частотой **ν** , што ўказвае на дваістасць прыроды выпраменьвання — **карпускулярна-хвалевы дуалізм**.



Вонкавы фотаэфект

Фотаэфект – гэта з’ява вызвалення (поўнае ці частковае) электронаў ад сувязей з атамамі і малекуламі рэчыва пад уздзеяннем выпраменьвання (інфрачырвонага, бачнага, ультрафіялетавага).

Калі электроны выходзяць за межы рэчыва, якое апраменьваецца, (поўнае вызваленне), то фотаэфект называецца **вонкавым** (адкрыты ў 1887г. Г.Герцам і падрабязна даследаваны ў 1888г. А.Г.Сталеваем).

Вонкавы фотаэфект назіраецца ў металаў.

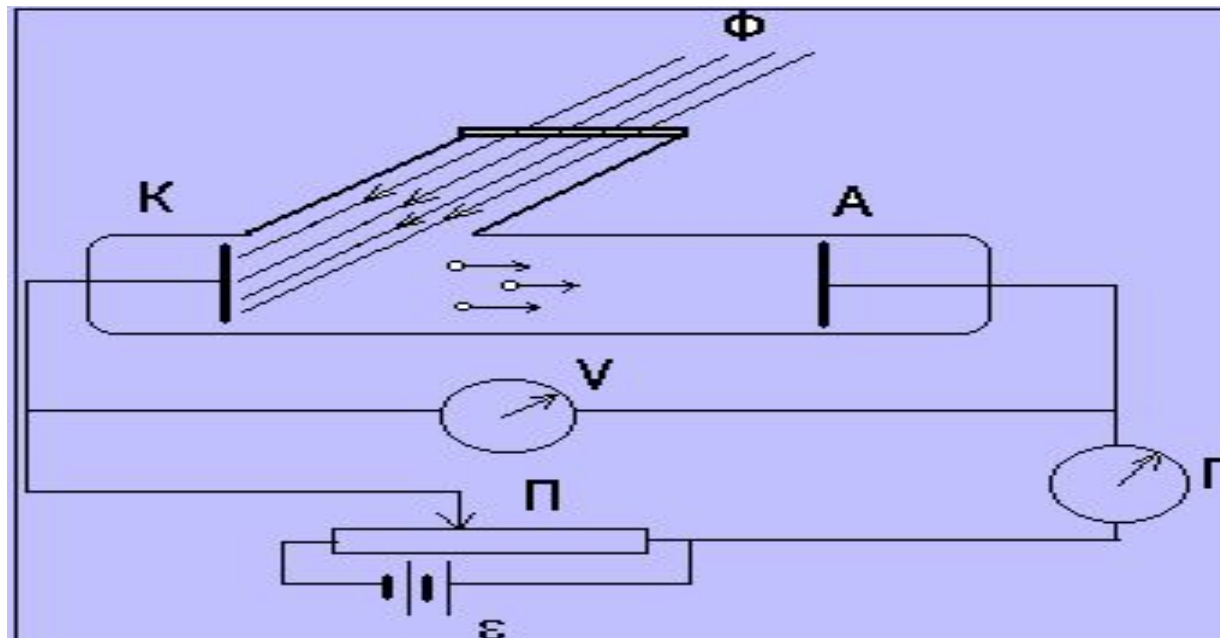
Доследы Ленарда і Томсана паказалі, што часціцы, якія вырываюцца з металу і маюць адмоўны зарад, з'яўляюцца электронамі.

Іх называюць фотаэлектронамі, а ток, які яны ўтвараюць, – фотатокам.

Принципова **схема** **ўстаноўкі**, з дапамогай
якой праводзіліся доследы па вонкаваму
фотаэфекту паказана на рысунку.

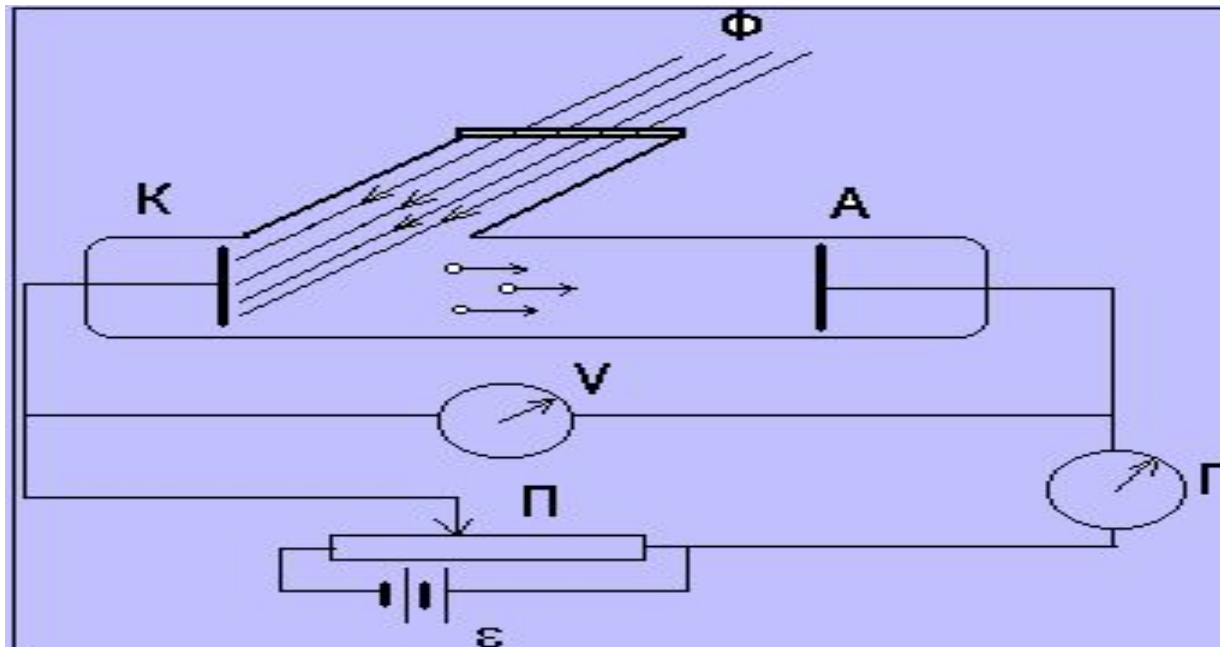
Вакуумны сасуд з кварцавым акенцам змяшчае
катод **К** і анод **А**.

Напружанне паміж катодам і анодам змяняецца
з дапамогай патэнцыяметра **П**.



Пры асвятленні катода **К** светлавым патокам **Φ** з яго вырываюцца фотаэлектроны, якія пад уздзеяннем электрычнага поля паміж катодам і анодам рухаюцца да анода і ўтвараюць электрычны ток (**фотаток**).

Напружанне вымяраецца вальтметрам **V**, ток – гальванометрам **Г**.



Експериментальныя даследаванні прывялі да адкрыцця асноўных законаў вонкавага фотаэфекту:

1. Фотаток насычэння (максімальны лік электронаў, якія вырываюцца ў адзінку часу) прама прапарцыяны светлавому патоку

$$I = k\Phi.$$

2. Максімальная скорасць фотаэлектронаў павялічваецца з павелічэннем частаты выпраменьвання, што падае на паверхню металу, і не залежыць ад яго інтэнсіўнасці

$$v_{\max} \sim \nu.$$

3. Для кожного рэчыва, з якога
вырываюцца фотаэлектроны, існуе
мінімальна частата, з якой пачынаецца
фотаэфект $\nu = \nu_{\min}$.

Гэту частату называюць чырвонай мяжой
фотаэфекту.

Законы вонкавага фотаэфекту
атрымліваюць дакладнае тлумачэнне на
аснове квантавай тэорыі
выпраменьвання.

Згодна гэтай тэорыі, велічыня светлавога патоку **Φ** вызначаецца **лікам квантаў** (фатонаў).

Кожны фатон можа ўзаемадзейнічаць толькі з адным электронам.

Таму максімальны лік фотаэлектронаў павінен быць прапарцыяйны светлавому патоку (**першы закон**).

Енергія фотона $h\nu$, яка паглинаецца
электронам, траціцца ім на здзяйсненне
работы выхаду A з металу і набыццё
кінетычнай энергіі $m\vartheta^2/2$.

Згодна закону захавання энергіі гэты працэс
адлюстроўваецца роўнасцю

$$h\nu = A + \frac{m\vartheta_{\max}^2}{2},$$

якая называецца раўнаннем Эйнштэйна.



Унутраны фотаэфект

У тым выпадку, калі электроны губляюць сувязь з атамамі і малекуламі толькі часткова і застаюцца ўнутры апрамененага рэчыва ў якасці “свабодных электронаў” фотаэфект называецца **ўнутраным фотаэфектам**.

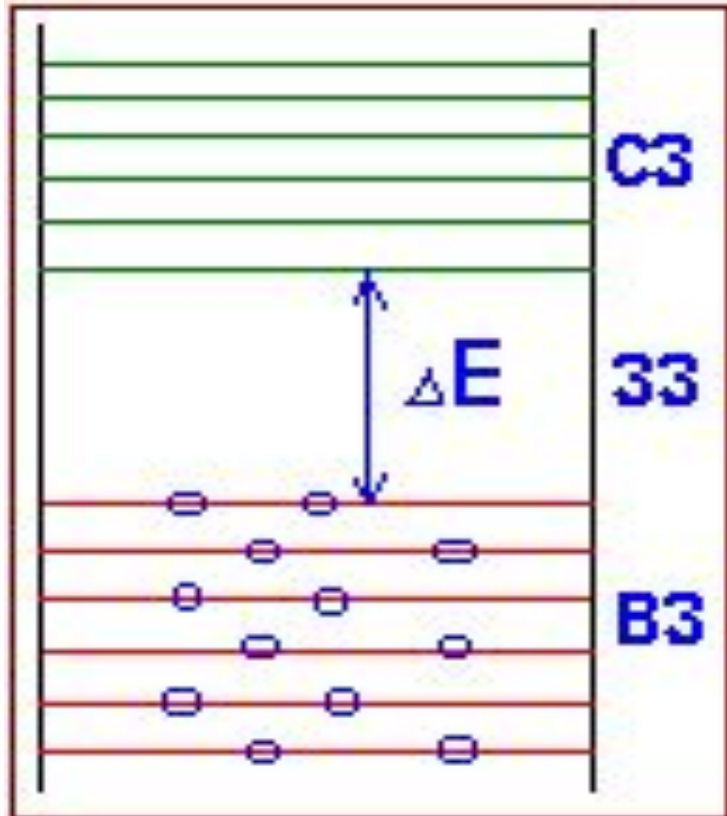
Пры гэтым электраправоднасць апрамененага рэчыва павялічваецца.

Унутраны фотаэфект назіраецца ў **паўправаднікоў** і, у меншай меры, у дыэлектрыкаў.

Быў адкрыты ў **1873г.** амерыканскім фізікам У. Смітам.

Структура паўправадніка ўключае тры зоны:
**валентную (ВЗ), забароненую (ЗЗ) і
свабодную (СЗ).**

Валентная зона паўправадніка поўнасьцю
запоўнена электронамі.

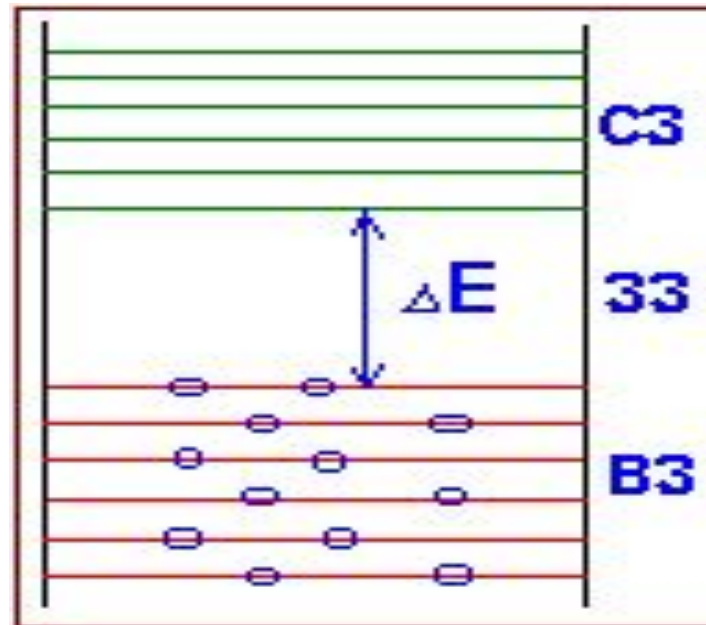


На кожным энергетычным
узроўні знаходзіцца па
два электрона з
супрацьлеглымі спінамі.

У забароненай зоне электроны знаходзіцца не могуць.

Яе шырыня ΔE вызначаецца ў адзінках энергіі, як правіла, у электрон-вольтах (эВ).

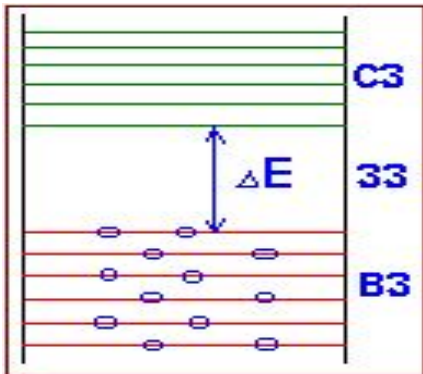
Для паўправаднікоў $\Delta E < 2\text{эВ}$.



Каб паўправаднік праводзіў электрычны ток трэба электроны з валентнай зоны (**ВЗ**) перавесці ў свабодную зону (**СЗ**) праз забароненую (**ЗЗ**).

У гэтым выпадку свабодная зона становіцца зонай праводнасці.

Для гэтага фатон, які ўзаемадзейнічае з валентным электронам, павінен валодаць энергіяй, якая задавальняе ўмове



$$h\nu \geq \Delta E$$



Применение фотоефекта

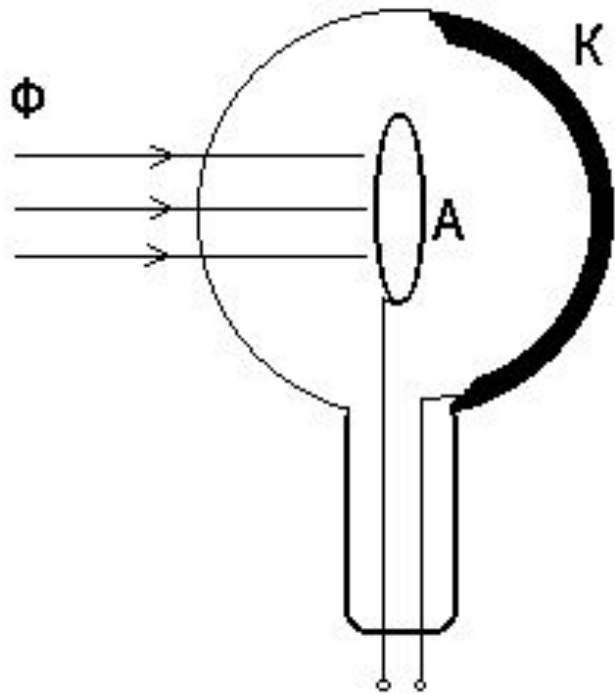
На фотоефекте заснавана дзеянне прыёмнікаў выпраменьвання — фотоелементаў, якія ператвараюць светлавы сігнал у электрычны.

З'ява вонкавага фотоефекту ляжыць у аснове работы вакуумных і газанапоўненых фотоелементаў.

Вакуумныя фотаэлементы вырабляюцца ў выглядзе шклянога балона, амаль палова ўнутранай паверхні якога пакрыта слоем адчувальнага да святла рэчывам.

Гэты слой з'яўляецца фотакатодам **K**.

У цэнтры балона знаходзіцца анод **A**.



На катод і анод падаецца напружанне, фотаэлектроны рухаюцца да аноду – утвараецца **фотаток**.

Большасць фотаэлементаў маюць сурмяна-цэзіявыя ці кіслародна-цэзіявыя катоды, якія валодаюць вялікай фотаадчувальнасцю.

Сурмяна-цэзіявыя адчувальны да бачнага і ўльтрафіялетавага выпраменьвання ($\sim 50 - 150$ мкА/лм); кіслародна-цэзіявыя – да інфрачырвонага ($\sim 20 - 80$ мкА/лм).

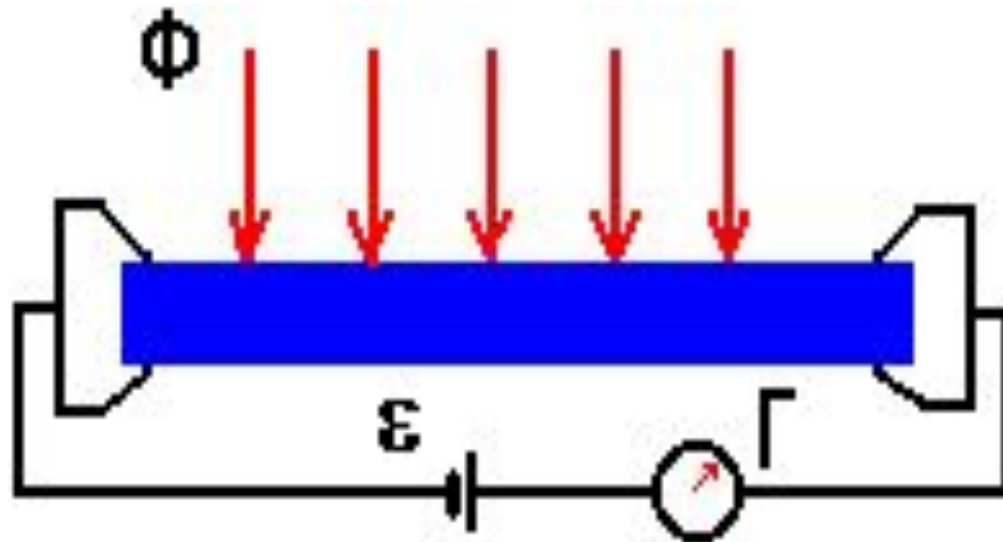
Для павелічэння адчувальнасці балон
фотаэлемента запаўняюць інертным
газам, **неонам** ці **аргонам** пры ціску $\sim 0,01$
мм.рт.сл.

Павелічэнне фотатоку адбываецца за кошт
іанізацыі газу.

Фотаадчувальнасць газанапоўненых
фотаэлементаў ~ 1000 **мкА/лм.**

Фотаелементи, які працюють на основі внутрішнього фотоефекту, називаються напівпровідниковими фотоелементами ці фотосупраціюваннями.

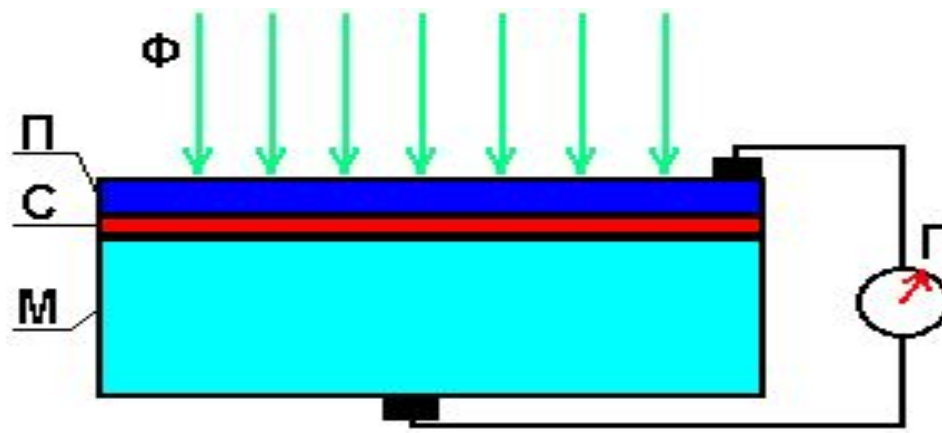
Для їх виробу використовуються селен (Se), серністи свинец (PbS), серністи кадмій (CdS), свинец-селен (PbSe), індій-сурма (InSb).



На ўнутраным фотаэфекце працуе таксама фотаэлемент з замыкальным слоем ці **вентыльны фотаэлемент**.

У зоне кантакту метал (**М**) – паўправаднік (**П**) утвараецца замыкальны слой (**С**), які валодае аднабаковай (вентыльнай) праводнасцю: прапускае электроны ў напрамку ад паўправадніка да металу.

Пры асвятленні святлом паміж электродамі ўзнікае рознасць патэнцыялаў $\sim 0,1\text{В}$.



Такім чынам, вентыльны фотаэлемент уяўляе сабой **генератар току**, ён непасрэдна пераўтварае **светлавую энергію** ў **электрычную**.

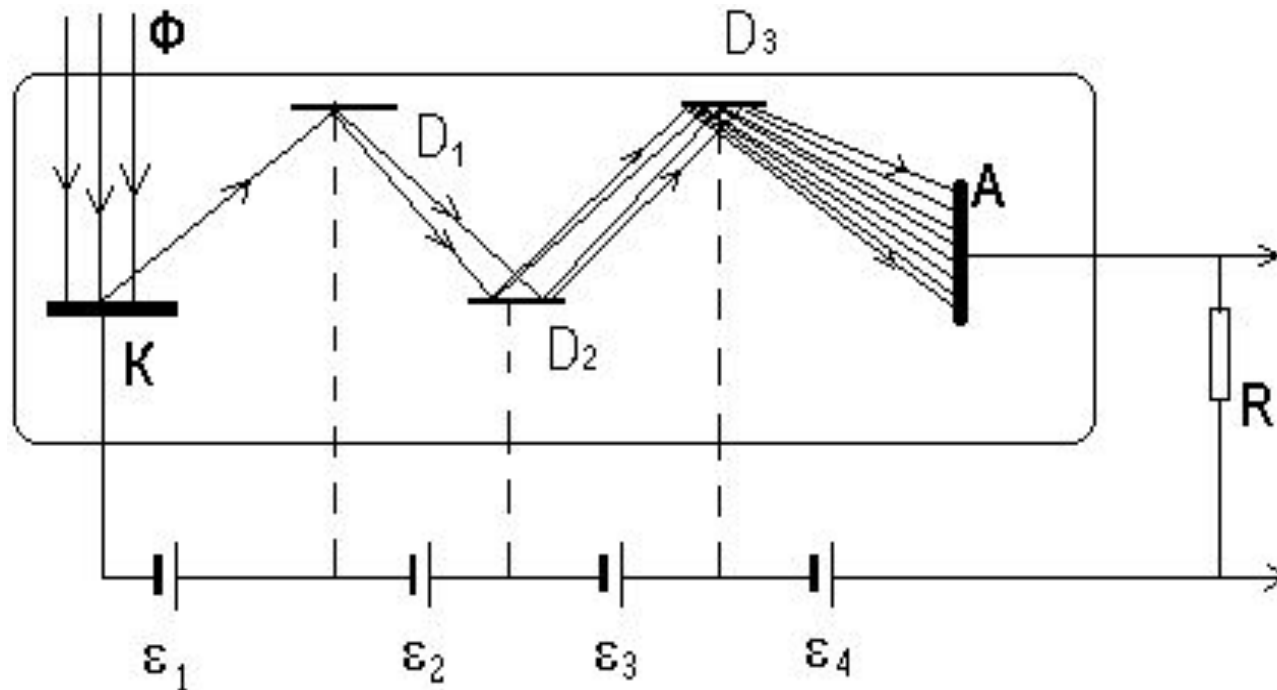
У якасці паўправаднікоў у вентыльным фотаэлеменце выкарыстоўваюць германій, крэмній, селен, закiсь медзі, серністы талій, серністае серабро і інш.

Фотаадчувальнасць **вентыльных** фотаэлементаў складае $\sim (2 - 30) \cdot 10^3 \text{ мкА/лм}$, іх магутнасць $\sim 500 \text{ мкВт/лм}$, каэфіцыент карыснага дзеяння ККД $\sim (10-15)\%$.

Для ўзмацнення фотаток у выкарыстоўваюць з'яву другаснай электроннай эмісіі, якая ляжыць у аснове работы **фотаэлектроннага памнажальніка (ФЭП)**.

ФЭП уяўляе сабой вакуумны фотаэлемент з шэрагам прамежкавых электродаў (**дзінодаў**) $D_1, D_2, \dots, D_n$ (іх бывае да 10-15).

Ток у ланцугу нагрузкі перавышае фотаток у **$(10^5 - 10^8)$ раз**.
Адчувальнасць ФЭП дасягае **10^3 А/лм**.



Прымяненне фотаэлементаў:

- 1. Для ўзнаўлення гуку ў кіно, атрымання відарыса ў тэлебачанні.**
- 2. У аўтаматычных і тэлемеханічных сістэмах (фотаэлемент – рэле):** падлік дэталей на канвейеры і кантроль іх памераў; ахоўная сігналізацыя; аўтаматыка дзвярэй, турнікетаў, кавальскіх молатаў; уключэнне і выключэнне вулічнага асвятлення, марскіх маякоў і інш.
- 3. У ваеннай тэхніцы:** прыборы начнога бачання, цеплавізары, лазерныя прыцэлы, саманаводныя снарады і ракеты, сістэмы супрацьпаветранай абароны і г.д.

4. У якасці фотаметричних прибо́раў: фатометры, люксметры, експанометры, якія выкарыстоўваюцца для вымярэння светлага патоку і асветленасці.
5. ФЭП для фіксацыі вельмі малых светлавых патокаў і асобных успышак у спектраметры; падліку сцынтыляцый у ядзернай фізіцы; назірання біялюмінесцэнцыі.
6. У сонечных батарэях (сукупнасць вентыльных фотаэлементаў) – пераўтварэнне сонечнай энергіі ў электрычную.



Ціск святла

Паколькі фатоны валодаюць імпульсам (mc), то светлавы паток павінен утвараць ціск на паверхню, на якую ён падае.

Пры ўзаемадзеянні патоку фатонаў з паверхняй адбываецца перадача імпульсу фатонаў гэтай паверхні, што прыводзіць да ўзнікнення імпульсу сілы ($F\Delta t$) і стварэння ціску ($p = F/S$).

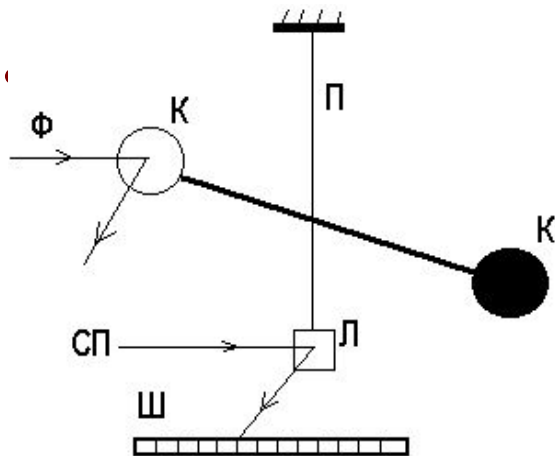
Згодна квантавай тэорыі святла і законаў
механікі **ціск** **святла** вызначаецца
роўнасцю

$$p = \frac{\Phi}{Sc} (1 + \rho) \quad ,$$

дзе **Φ** – светлавы паток, **S** – плошча
паверхні, **c** – скорасць святла ў вакууме,
 ρ - каэфіцыент адбіцця.

Экспериментальна світлавы ціск
упершыню выявіў і вызначыў у **1900г. П.**
М.Лебедзеў.

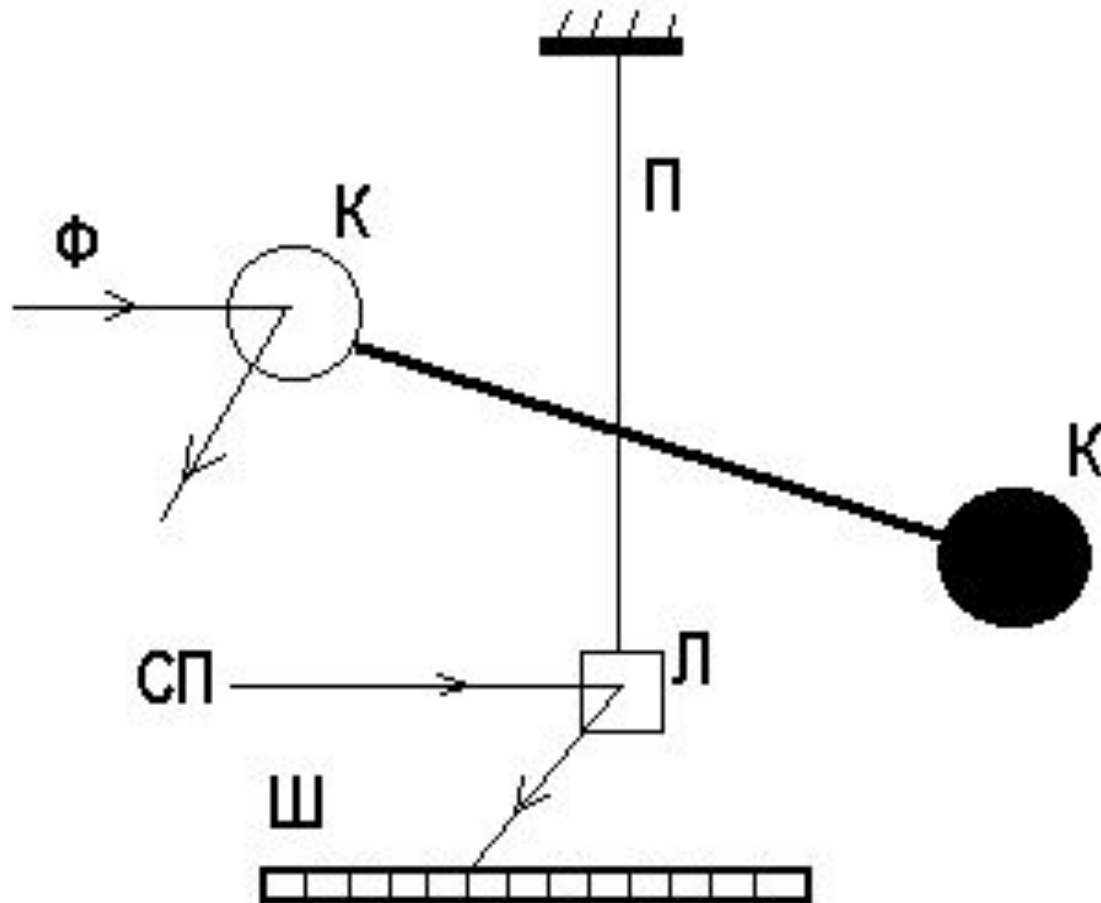
Для гэтага быў выкарыстаны **лёгкі**
падвес у выглядзе карамысла на вельмі
тонкай і пругкай нітцы, да якога былі
прымацаваны лёгкія крылцы ў
выглядзе дыскаў таўшчынёй ад **0,01** да
0,1мм.



Ціск Φ – светлавы паток,
К – крыльца,

р $\sim$ **ЗмкПа** – пругкі падвес,

СП – светлавы
прамень,



Φ – светлавы
паток,
К – крыльца,
П – пругкі падвес,
СП – светлавы
прамень,
Л – люстэрка,
Ш – шкала.

Светлавы ціск адыгрывае важную ролю ў
цэлым шэрагу фізічных з'яў.

Ціск святла разам з ціскам газу забяспечвае
стабільнасць зорак. Пры гэтым сіла ціску
кампенсуе іх гравітацыйнае сцісканне.

Ціск аказвае ўплыў на **дынаміку**
калязоркавага і міжзоркавага **газу**.

Формы каменных хвастоў вызначаюцца
ціскам святла (пашыраюцца пры
набліжэнні да Сонца і накіраваны ў
супрацьлеглы ад яго бок).



Хімічнае і біялагічнае дзеянне святла

Рэакцыі, якія адбываюцца пад уздзеяннем святла, называюцца **фотахімічнымі**.

Пры дзеянні святла атамы і малекулы рэчыва пераходзяць у ўзбуджаны стан і становяцца **хімічна актыўнымі**. Гэты працэс называецца **актывацыяй** і працякае па наступнай схеме:



дзе **A** – малекула (атам) у асноўным стане, **$h\nu$** – энергія фатона, **A^*** – актывіраваная малекула (атам).

Для фотохімічнага пераўтварэння адной малекулы патрабуецца вызначаная **энергія актывацыі E_A** .

Гэта азначае, што паглынуты фатон можа актывізаваць малекулы пры ўмове, калі **$h\nu \geq E_A$** .

Частата **$\nu_0 = E_A / h$** называецца **парогавай частотой**, яна характэрна для кожнай фотохімічнай рэакцыі.

Эффектыўнасць фотахімічных рэакцый вызначаецца квантавым выхадам - стасункам ліку малекул (N_M), якія ўступілі ў рэакцыю, да ліку паглынутых фатонаў (N_Φ)

$$\varphi = N_M / N_\Phi .$$

Першасныя фотахімічныя пераўтварэнні падпарадкоўваюцца наступным заканамернасцям:

1. Маса рэчыва, якое ўдзельнічае ў фотахімічнай рэакцыі, прапарцыйна энергіі паглынутага монахраматычнага выпраменьвання (закон Бунзена – Роско):

$$m = k\Phi t .$$

2. Адзін паглынуты квант вызывае пераўтварэнне толькі адной малекулы (судачынне Эйнштэйна).

Пад уздзеяннем святла адбываецца фотахімічная рэакцыя дысацыяцыі, якая ляжыць у аснове фатаграфіі,



Фотахімічныя рэакцыі маюць вялікае значэнне для ўзнікнення зрокавых адчуванняў.

Пад уздзеяннем святла адбываецца актывацыя палачак (~120млн.) – сумярэчны зрок і колбачак (~ 6млн.) – дзённы зрок і адрозненне колераў.

Пад уздзеяннем святла адбываецца лінянне фарбаў і г.д.

Святло іграе вялікую ролю ў жывой прыродзе.

Пад яго ўздзеяннем адбываецца галоўны працэс у жыцці зялёных раслін – **фотасінтэз**.

Пры гэтым святло паглынаецца пігментам зялёных раслін – **хлорафілам**.

Актывіраваныя святлом малекулы хлорафіла ўдзельнічаюць у працэсе міжмалекулярнага пераносу электронаў.

Квантавы выхад фотасінтэзу ў сучасны момант лічаць роўным $\phi = 1/8$.

Галоўнай крыніцай біямасы і атмасфернага кіслароду на Зямлі з'яўляюцца расліны.

Яны выкарыстоўваюць каля **2%** сонечнай энергіі, што падае на іх.

У сярэднім кожны **1дм²** паверхні зялёнага лісця засвайвае з атмасферы **1мг** вуглякіслага газу ў гадзіну.

Прадукцыя фотасінтэзу на ўсім зямным шары складае **$4 \cdot 10^{10}$ т** звязанага вугляроду ў год.

Інфрачырвонае выпраменьванне (**ІЧ**) пранікае ў цела на глыбіню да **2см** і прыводзіць да яго **награвання**.

Пад уздзеяннем ультрафіялетавага выпраменьвання (**УФ**) Сонца ў скуры сінтэзіруецца неабходны для нармальнага жыцця арганізму **вітамін D**.

УФ-прамяні пранікаюць скрозь скуру чалавека на глыбіню да **0,5мм**, што прыводзіць да загартыўкі і ўмацавання арганізму.

Але перадазіроўка УФ апраменьвання можа прывесці да пашкоджання макрамалекул, з'яўлення **мутацый**.

Пігмент (**загар**), які ўтвараецца пад скурай, абараняе арганізм ад лішняга ўздзеяння УФ-прамянёў. Штучная крыніца УФ – **кварцавая лампа**.

