

# Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

## ОПТИКА. ФОТОМЕТРІЯ

### Зміст

#### §1. Фотометричні величини

1. Поширення випромінювання точкового джерела. Тілесний кут
2. Характеристики випромінювальної здатності джерела. Світловий потік. Сила світла
3. Характеристики опроміненості поверхні. Освітленість. Закон освітленості
4. Співвідношення між енергетичними та візуальними характеристиками випромінювання
5. Яскравість і енергетична променістість
6. Світність
7. Фотометричні характеристики в діяльності людини
8. Приклади

#### §1. Фотометричні величини

##### *1.Поширення випромінювання точкового джерела. Тілесний кут*

Якщо розглядати точкове *ізотропне джерело*, тобто джерело у вигляді матеріальної точки, яке випромінює однаково в усіх напрямках, то можна відзначити, що випромінювання в даному напрямку поширюється всередині конічної поверхні.

Напрямком поширення світла служить вісь цієї поверхні.

Частина простору, обмежена конічною поверхнею зі замкненою направляючою, називається *тілесним кутом*.

Відношення площи поверхні, вирізаної з довільної сфери даним тілесним кутом з вершиною в центрі цієї сфери, до квадрата її радіуса, є сталим і служить мірою тілесного кута та приймається за його величину

$$\Omega = \frac{S_n}{r^2}.$$

Одиницею тілесного кута є *стерадіан* (позначається ср) – центральний тілесний кут який вирізає зі сфери поверхню площею рівною квадрату радіуса цієї сфери.

Максимальний тілесний кут. рівний кутові огляду всієї сфери з її центру, становитиме

$$\Omega_m = \frac{S_m}{r^2} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ ср.}$$

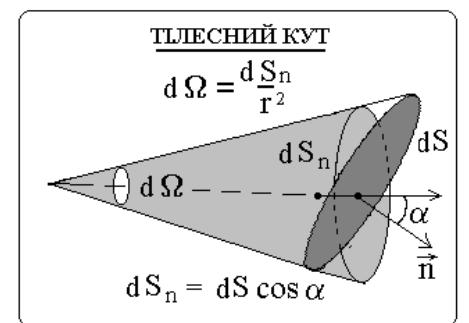
Доцільно знайти *елементарний тілесний кут*, тобто такий, під яким з деякої точки видно елементарну поверхню площею  $dS$  на відстані  $r$ . Для цього слід виразити площу цієї поверхні через площу поверхні нормальню до осі кута

$$dS_n = dS \cos \alpha,$$

тоді

$$d\Omega = \frac{dS_n}{r^2} = \frac{dS \cdot \cos \alpha}{r^2}.$$

##### *2. Характеристики випромінювальної здатності джерела. Світловий потік. Сила світла*



## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Розрізняють *енергетичні* (радіаційні) характеристики випромінювання, які є об'єктивними і визначаються фізичною дією (за вимірювальними приладами) та *зорові* (візуальні), які носять суб'єктивний характер і визначаються за зоровими відчуттями (як кажуть, «на око»).

Саме останні найчастіше вживаються в побуті та на виробництві.

*Потужність випромінювання, що поширюється всередині деякого тілесного кута, визначена за зоровими відчуттями називається світловим потоком ( $\Phi$ )*.

Якщо  $W^l$  — енергія,  $P^l$  — потужність випромінювання визначені за зоровими відчуттями (візуально), то

$$\Phi = \frac{W^l}{t} = P^l.$$

*Одиниця вимірювання світлового потоку в системі СІ є похідною від одиниці сили світла.*

*Силою світла* ізотропного джерела називається відношення світлового потоку ( $\Phi$ ) до величини тілесного кута ( $\Omega$ ), в якому поширюється цей потік

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

Також

$$I = \frac{\Phi_m}{\Omega_m} = \frac{\Phi_m}{4\pi}.$$

*Для довільного (неізотропного) джерела*

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}.$$

У випадку визначення сили світла протяжного джерела, розглядається потік  $d\Phi$ , випромінюаний елементом поверхні  $ds$  в межах тілесного кута  $d\Omega$ .

*Відповідна енергетична характеристика* називається *силою випромінювання (J)*, або *енергетичною силою світла* і визначається у випадку ізотропного джерела формулою

$$J = \frac{P}{\Omega},$$

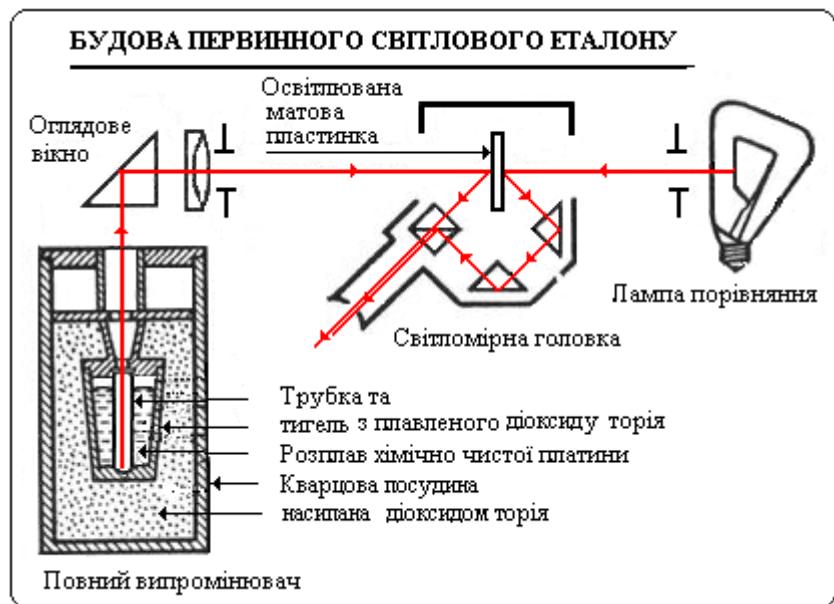
неізотропного

$$J = \frac{dP}{d\Omega}.$$

Вимірюється у Вт/ср.

*За одиницю сили світла*, яка в системі СІ належить до основних, *приймається кандела* (позначається  $cd$ ) — сила світла еталонного джерела в певному напрямку.

Точніше можна сказати, що *кандела* — це сила світла, яка випромінюється з поверхні площею  $1/60 \text{ см}^2$  абсолютної випромінювача, який має енергетичною силу випромінювання, в напрямку, перпендикулярному до поверхні, при частоті  $5,4 \cdot 10^{14}$  Гц



## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

(довжині хвилі 0,555 мкм), рівну 1/683 Вт/ср при температурі тверднення платини (2042,5 К) і нормальному атмосферному тиску (101325 Па).

Еталон кандели був розроблений у США, прийнятий за міжнародною угодою 01.01.1948 р., реалізований у 8 національних лабораторіях і затверджений у 1967 році рішенням Генеральної конференції по мірам і вагам. Він складається зі закритої внизу керамічної трубки діаметром до 2 мм і довжиною 40 мм, яка поміщена у тигель, в якому розплавляється чиста платина. Для термоізоляції тигель поміщений у посудину зі порошком торію. Платина розплавляється індукційними струмами, які збуджуються змінним струмом, що протікає по обмотці. Випромінювання виходить через отвір у кришці посудини і спрямовується на фотометр для порівняння зі досліджуваним джерелом.

Світловий потік точкового ізотропного джерела можна виразити через силу світла.

$$\Phi = I\Omega.$$

Ця формула дозволяє виразити одиницю світлового потоку – люмен (позначається лм), через одиницю сили світла. Таким чином матимемо

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}.$$

Тобто, за один люмен приймається світловий потік точкового ізотропного джерела силою світла 1 кд в тілесному куті 1 ср.

Світловий потік точкового ізотропного джерела в усіх напрямках ( $\Phi_m$  – максимальний, повний потік), який випромінюється в тілесному куті  $-4\pi$  ср.

$$\Phi_m = I\Omega_m = 4\pi I.$$

### 3. Характеристики опроміненості поверхні. Освітленість. Закон освітленості

Підставивши в формулу сили світла

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

вираз для тілесного кута

$$d\Omega = \frac{dS_n}{r^2} = \frac{dS \cdot \cos\alpha}{r^2},$$

Матимемо

$$I = \frac{d\Phi r^2}{dS \cos\alpha} (2.1).$$

З отриманої формулі випливає доцільність розгляду відношення

$$E = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Таке відношення світлового потоку до площині поверхні, по якій розподіляється потік, називається **освітленістю** поверхні.

При рівномірному розподілі потоку

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Остання формула визначає також одиницю освітленості люкс (лк).

$$1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}$$

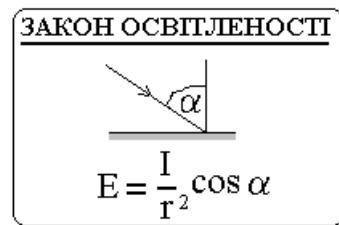
Люкс – це освітленість створювана потоком 1 лм рівномірно розподіленим по поверхні з площею 1 м<sup>2</sup>.

Відповідна радіаційна характеристика називається *енергетичною освітленістю*, або *опроміненістю* і вимірюється у Вт / м<sup>2</sup>.

Пов'яжемо освітленість з силою світла точкового джерела та відстанню точки спостереження до нього.

З формули (2.1)

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos\alpha}{r^2}.$$



## Плющай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Отримана формула виражас **закон освітленості (закон Ламберта)**, за яким освітленість від точкового джерела даної точки поверхні прямо пропорційна силі світла джерела косинусові падіння променів і обернено пропорційна квадрату відстані до джерела.

Зауважимо, що кут падіння променів відраховується від нормалі до поверхні.

### Історична довідка

Залежність освітленості від оберненого квадрата відстані була встановлена у 1604 році відомим німецьким астрономом Йоганном Кеплером. У 1729 році французький фізик П. Бугер запропонував візуальний метод порівняння джерел світла, який лежить в основі конструкції простіших фотометрів. Німецький фізик І. Ламберт у 1760 році розробив теоретичні засади фотометрії.

### 4. Співвідношення між енергетичними та візуальними характеристиками випромінювання

Візуальні характеристики звичайно є суб'єктивними і залежать від чутливості ока до випромінювання даної частоти, яка характеризується **функцією видності (спектральної чутливості)**, що графічно задається **кривою відносної спектральної чутливості ока**.

З цієї кривої випливає, що максимальна чутливість ока припадає на випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda_m = 0,555$  мкм, яка відповідає жовто-зеленому світлу.

Щоб випромінювання з довжиною хвилі 0,76 мкм (червоне світло) викликало таке ж відчуття яскравості, потужність його має бути збільшена в 20 000 разів.

Коефіцієнт видності  $V_\lambda$ , або відносної спектральної чутливості, є відношенням потужностей випромінювання на довжині хвилі максимальної чутливості  $P_m$  та на даній довжині хвилі  $P_\lambda$ , які викликають однакову дію на око

$$V_\lambda = \frac{P_m}{P_\lambda}.$$

Візуальні характеристики пов'язуються з радіаційними через **коефіцієнт світлової ефективності**  $\eta_\lambda$ , який переводить енергетичні (радіаційні) характеристики у візуальні і, наприклад, показує, скільки люменів відповідають одиниці потужності вату.

Для довжини світлової хвилі  $\lambda_m$ , максимально відчутної оком (0,555 мкм) потоку в 1 лм відповідає потужність випромінювання (потік енергії) 0,0016 Вт, тому коефіцієнт світлової ефективності для цієї довжини хвилі рівний 1/0,0016 лм / Вт, або

$$\eta_{\lambda m} = 625 \text{ лм/Вт.}$$

Коефіцієнт світлової ефективності для довільної довжини хвилі знаходиться множенням попереднього коефіцієнту на коефіцієнт відносної спектральної чутливості  $V_\lambda$ .

$$\eta_\lambda = \eta_{\lambda m} V_\lambda.$$

Таким чином зв'язок потужності випромінювання з світловим потоком

$$\Phi = \eta_\lambda P = \eta_{\lambda m} V_\lambda P.$$

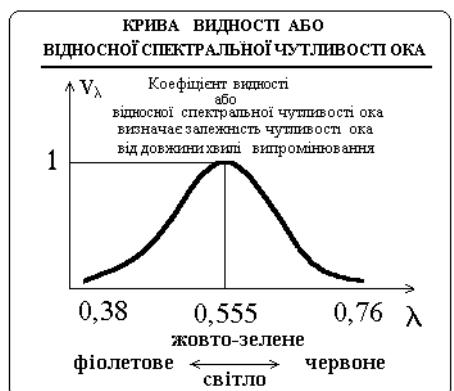
Обернений коефіцієнт  $k_\lambda$  (*енергетичний, або механічний еквівалент*) переводить зорові (візуальні) характеристики у енергетичні.

Для максимально відчутної довжини хвилі.

$$k_{\lambda m} = 1 / \eta_{\lambda m} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт / лм.}$$

Також

$$k_\lambda = 1 / \eta_\lambda = 1 / \eta_{\lambda m} V_\lambda.$$



## 5. Яскравість і енергетична променистість

Візуальною характеристикою випромінювальної здатності протяжних джерел в даному напрямку є яскравість, яка позначається  $B_\theta$  (Bright, англ. – яскравий), або  $L_\theta$ , де кутовий індекс вказує на залежність яскравості елементарної площини від напрямку випромінювання).

**Яскравість в даному напрямку**  $B_\theta$  – це відношення світлового потоку  $d\Phi_\theta$  елемента поверхні  $ds$  в даному напрямку  $\theta$  до геометричного фактора ( добутку величини тілесного кута на видиму площину елемента випромінюючої поверхні –  $d\Omega ds_\theta$ ) у відповідності до формули

$$B_\theta = \frac{d\Phi_\theta}{d\Omega ds_\theta} = \frac{d\Phi_\theta}{d\Omega ds \cos \theta},$$

яка при підстановці

$$I_\theta = \frac{d\Phi_\theta}{d\Omega}$$

переходить в

$$B_\theta = \frac{I_\theta}{ds \cos \theta}.$$

Можна також сказати, що яскравість в даному напрямку є відношенням сили світла в даному напрямку до видимої площи випромінюючої поверхні.

$$B_\theta = \frac{dI_\theta}{ds_\theta} = \frac{dI_\theta}{ds \cos \theta}.$$

Одиницею яскравості є кандела на квадратний метр.

Відповідна енергетична характеристика – енергетична яскравість вимірюється у  $\text{Вт}/\text{м}^2$  спр.

Як приклад величини яскравості, можна зазначити, що яскравість поверхні Сонця становить  $1,5 \cdot 10^9 \text{ кд}/\text{м}^2$ , вольфрамової нитки лампи розжарювання  $4,5 \cdot 10^6 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

Джерела з яскравістю більшою  $1,6 \cdot 10^5 \text{ кд}/\text{м}^2$  викликають у ока болові відчуття.

Джерело, що має однакову яскравість в усіх напрямках ( $B_\theta = B = \text{const}$ ) називається ламбертовим, оскільки для цього джерела виконується **закон Ламберта**, який стверджує, що світловий потік елемента поверхні такого джерела, спостережуваного під кутом  $\theta$  до його нормалі прямопропорційний косинусу вказаного кута.

Дійсно, з означення яскравості, матимемо

$$d\Phi_\theta = B_\theta d\Omega ds \cos \theta,$$

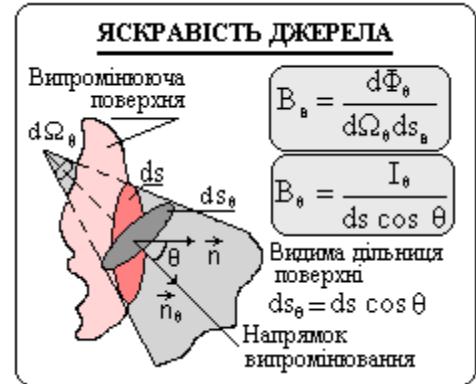
а при  $B_\theta = B$

$$d\Phi_\theta = B d\Omega ds \cos \theta = I \cos \theta.$$

Прикладом ламбертових джерел можуть бути Сонце та освітлювана поверхня з матовим покриттям, які мають практично одинакову яскравість в усіх напрямках.

## 6. Світність

**Світність** ( $M$ ) характеризує поверхневу густину видимого випромінювання протяжного джерела і є відношенням світлового потоку ( $d\Phi$ ), що випромінюється елементом поверхні в усіх напрямках (тобто всередині тілесного кута  $2\pi \text{ спр}$ ) до площи ( $d s$ ) елемента



## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

$$M = \frac{\Phi_{2\pi}}{ds} (\text{л м} / \text{м}^2).$$

Відповідною енергетичною величиною є **енергетична світність L**, або поверхнева густина випромінювання, яка вимірюється у Вт/м<sup>2</sup>.

Для ламбертових джерел

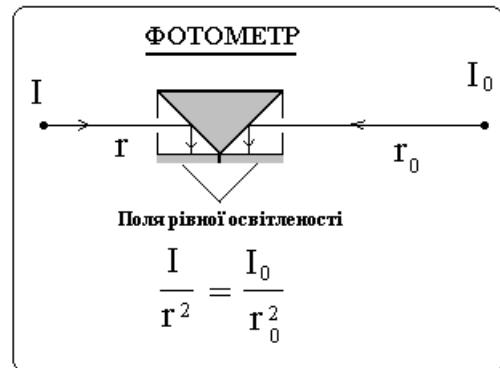
$$M = \pi B$$

### 7. Фотометричні характеристики в діяльності людини

Прилади призначені для вимірювання характеристик випромінювання називаються **фотометрами**. За принципом реєстрації випромінювання фотометри поділяються на візуальні (суб'єктивні) та об'єктивні.

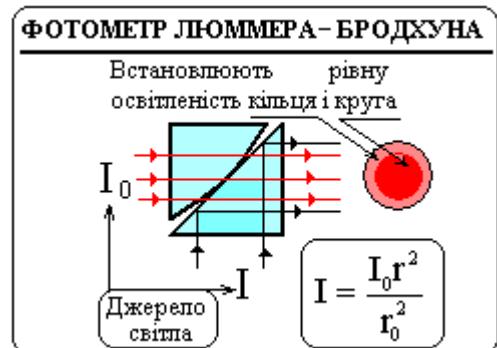
В основі дії поширених фотометрів лежить спосіб вирівнювання освітленості полів, на які падають промені від двох джерел, шляхом зміни відстані до джерел. За відомою силою світла одного джерела можна знайти силу світла іншого, вимірявши відстані від джерел до призми фотометра.

$$I = \frac{I_0 r^2}{r_0^2}$$



Існують також об'єктивні прилади для вимірювання освітленості, що використовують електричну дію світла та базуються на фотоелементах – фотометри та люксметри

Можливості розрізnenня людиною різноманітних об'єктів залежать від рівня їх освітленості. Так освітленість на вулиці в сонячний день становить  $10^5$  лк, хмари зменшують цю освітленість приблизно в сто разів. Повний Місяць дає 0,2 лк, молодий – соті долі, безхмарне зоряне небо вночі – тисячні долі люкса. Освітленість в десятитисячні долі люкса дозволяє з трудом орієнтуватись вночі. При одному люксі можна з напруженням читати, але задовільною є освітленість 50 лк, причому для тонких робіт потрібна вдвічі більша. В класних приміщеннях на столах учнів освітленість повинна складати 75 лк.



Реальна ефективність джерел світла визначається іх світовою віддачею по відношенню до потужності, яку вони споживають.

Джерелами світла в повсякденному житті служать, як правило різноманітного типу лампи, серед яких найчастіше використовується електрична лампа розжарювання винайдена в 1872 році російським вченим А. Н. Лодигіним і вдосконалена американським конструктором Т.А. Едісоном. В сучасних лампах такого типу випромінювачем є розжарена струмом до температури  $2700 - 2800^{\circ}\text{C}$  вольфрамова нитка, що знаходитьться в скляному балоні в вакуумі, або в газі, який хімічно не взаємодіє з вольфрамом, і загальмує його випаровування (азотом, аргоном). В газонаповнених лампах температура розжарювання вища, ніж в пустотних.

## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Світлова віддача таких ламп в основному становить 10 лм/Вт, досягаючи в потужних, де застосовуються товщі нитки, вдвічі більшого значення.

### ВІЗУАЛЬНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИПРОМІНОВАННЯ

Візуальні характеристики	Позначення	Одиниці вимірювання	Енергетичні характеристики	Позначення	Одиниці вимірювання
Світловий потік	Ф		Потужність випромінювання		
Світлова енергія	W <sup>l</sup>	лм·сек	Енергія випромінювання	W	Дж
Сила світла джерела (в деякому напрямку)	I	кд	Сила випромінювання	I <sub>e</sub>	Вт / ср
Освітленість (в точці поверхні)	E	лк	Опроміненість	E <sub>e</sub>	Вт / м <sup>2</sup>
Яскравість (в даній точці та в заданому напрямку)	L, B	кд / м <sup>2</sup>	Енергетична яскравість	L <sub>e</sub>	Вт / м <sup>2</sup> ср
Світність (в точці поверхні випромінювача)	M	лм/м <sup>2</sup>	Енергетична світність ( Поверхнева густина випромінювання)	M <sub>e</sub>	Вт / м <sup>2</sup>

### 8. Приклади

1. Розрахуємо освітленість від електролампи потужністю 100 Вт на відстані 1м від неї.

*Розв'язання.* Повний світловий потік лампи при стандартній світловій віддачі  $\eta=10$  лм/Вт становитиме  $\Phi_m = \eta P = 10 \cdot 100 = 10^3$  лм.

$$\text{Сила світла лампи } I = \frac{\Phi_m}{4\pi} = \frac{10^3}{12,56} \approx 80 \text{ кд.}$$

Освітленість

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\alpha = \frac{\Phi_m}{4\pi \cdot r^2} = \frac{10^3}{12,56 \cdot 1^2} \approx 80 \text{ лк.}$$

Щоправда більш точні розрахунки дають дещо меншу величину.

2. Оцінимо кількість стоватних ламп необхідних для освітлення аудиторії площею 65 м<sup>2</sup> при необхідній освітленості 75 лк.

*Розв'язання.* Необхідний потік на рівні робочих місць  $\Phi = E S = 75 \cdot 65 = 4875$  лм.

Цей потік можуть створити лампи загальною потужністю  $P = \Phi/\eta = 2 \cdot 0,1 \cdot 4875 = 9750$  Вт.

Множник 2 враховує втрати на поглинання стелею і стінами. Таку потужність можуть забезпечити 10 стоватних ламп.

## § 2. Оптичні прилади

Оптичні прилади створені людством значно розширили можливості зорового вивчення світу. Так неозброєне око здатне розрізняти деталі розміром до 0,1 мм, з допомогою лупи до 0,01мм, мікроскопа до 0,15 мкм.

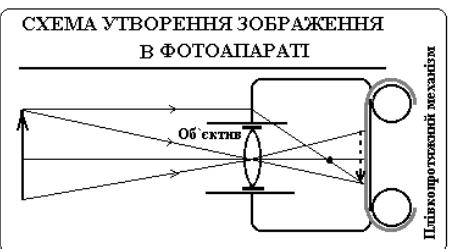
### 1. Фотоапарат

Фотографія з'явилась в результаті відкриття хімічної дії світла – здатності світла викликати хімічні реакції. В зв'язку цим з'явилась можливість створення фотопластин, на які проектувалось оптичне зображення з метою його фіксації. Точки зображення, в залежності від своєї яскравості, в результаті хімічної реакції, викликали потемніння різного ступеня відповідних точок пластини, і таким чином зображення фіксувалось.

Винахідниками фотографії вважаються французи Жозеф Нісефор Н'єпс (1765 – 1833) і Луї Жак Манде Дагер (1787 – 1851), які ще в 1839 році винайшли спосіб фіксації зображення на металевих пластинках. Зображення, яке фіксувалось з допомогою фотохімічної реакції, отримувалось з допомогою камери – обскури. Фотографії одержані цим методом називали дагеротипами. За цим способом фотографії виготовлялись в одиничному екземплярі.

Англієць Вільям Генрі Фокс Талбот (1800 – 1877) розробив спосіб фіксації зображення на негативі, з якого можна було виготовляти позитивні копії.

Згодом пластини змінились плівками, які реєстрували і кольори зображення.



## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Конструктивно фотоапарат являє собою світлонепроникну камеру з отвором в стінці, куди вставляється об'єктив – система лінз, що діє, як одна збиральна лінза.

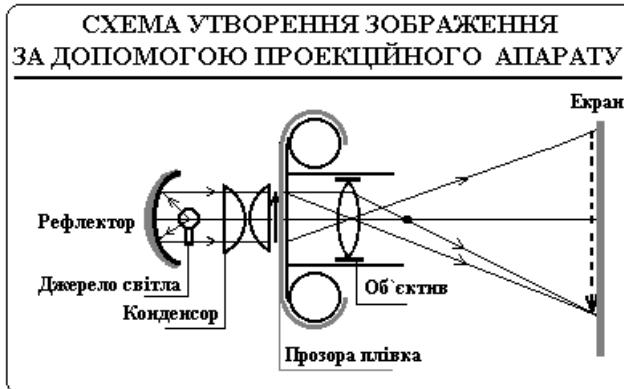
Об'єктив утворює дійсне зображення предмета на протилежній стінці фотокамери, вздовж якої розташовується світлоприймальний елемент, або протягуються плівка, на яких фіксується зображення.

В кінці 60-х років було виявлено, що структури комплементарних метал-оксид напівпровідників КМОН (CMOS) мають світлоочутливість і з'явилися світлоприймальні пластини (матриці) на цих структурах. Інший тип фоточутливих напівпровідникових елементів – прилади зі зарядовим зв'язком ПЗЗ (CCD – Charge Coupled Device), були винайдені в кінці 1969 р. Уільямом Бойлем (William Boyle) та Джорджем Смітом (George Smith) при Bell Labs. Ці матриці забезпечували вищу якість формування зображень, щоправда за більшого енергоспоживання і меншої компактності.

Таким чином, в сучасній *цифровій фотографії* світлоприймальна пластина (сенсор) являє собою матрицю зі світлоочутливими зернами, які, підпадаючи під точки зображення різної яскравості, набувають різного потенціалу. Ці потенціали, зчитуються на картку пам'яті і зберігаються на ній у цифровому коді, який дозволяє в подальшому відтворити зображення.

### 2. Проекційний апарат

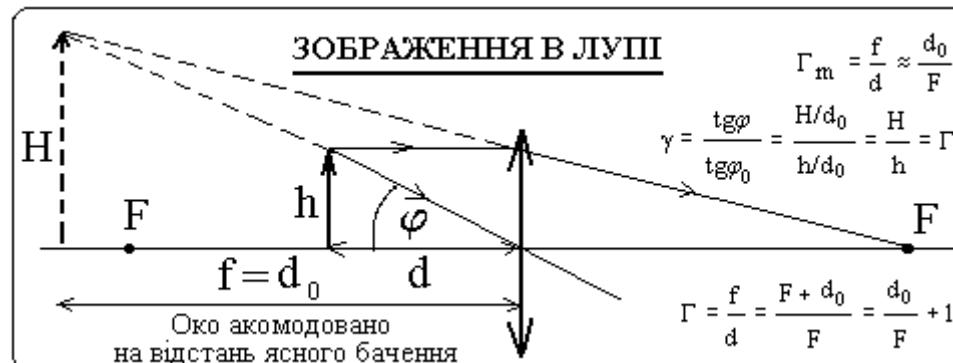
Серед проекційних апаратів розрізняють: діапроектори, які дозволяють отримати на екрані зображення графічних об'єктів зафікованих на прозорих носіях – плівках чи пластинках (кіноплівка, фотоплівка, діафільм, діапозитив); епіпроектори, які дають зображення графіки з непрозорих носіїв, та апарати, що поєднують властивості двох названих – епідіапроектори (епідіаскопи).



До діапроекторів належать, зокрема, *кінопроектори* (*кіноапарати*), які дозволяють відтворити на екрані рух об'єктів. Таку можливість створює інерційність зору – властивість ока зберігати зображення на сітківці на протязі 0,1 секунди. Послідовна проекція кадрів, які фіксують фази руху з частотою не меншою ніж 10 кадрів за секунду, створює враження неперервності екранного руху. Дійсна частота проекції в кіно складає 24 кадри за секунду. На час зміни кінокадру на наступний, об'єктив кінопроектора перекривається механічним переривачем – обтюраторм.

### 3. Лупа

Лупа – короткофокусна лінза, яка використовується для розглядання збільшеного зображення предметів.



## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

Для одержання прямого збільшеного зображення, предмет слід розташовувати між лінзою і фокусом

Лупа дає як кутове, так і лінійне збільшення. Кутове збільшення дає можливість розрізnenня тих точок предмета, які для неозброєного ока зливались. Таким чином з допомогою лупи можна розрізнати більше деталей предмета. Розрахунок збільшення залежить від заданих умов спостереження.

1) Якщо око акомодовано на відстань ясного бачення ( найкращого зору )  $d_0$ , то це означає, що предмет розташовуємо на такій відстані від лупи  $d$ , щоб зображення його утворювалось на відстані ясного бачення.

Враховуючи те, що для одержання максимального збільшення предмет поміщають поблизу фокуса, можна вважати, що  $d \approx F$ , і для лінійного збільшення наближено знайти

$$\Gamma_m = \frac{f}{d} \approx \frac{d_0}{F}.$$

При більш точніших розрахунках слід скористатися формулами лінзи

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$$

звідки

$$d = \frac{Ff}{F+f} = \frac{Fd_0}{F+d_0}$$

і

$$\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{F+d_0}{F} = \frac{d_0}{F} + 1$$

Для кутового збільшення

$$\gamma = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0}$$

тут  $\varphi_0$  – кут спостереження предмета неозброєним оком з відстані найкращого бачення

$$\tan \varphi_0 = \frac{h}{d_0},$$

$\varphi$  – кут спостереження за допомогою лупи

$$\tan \varphi = \frac{H}{d_0}.$$

Після підстановки в початкову формулу,

$$\gamma = \frac{H/d_0}{h/d_0} = \frac{H}{h} = \Gamma.$$

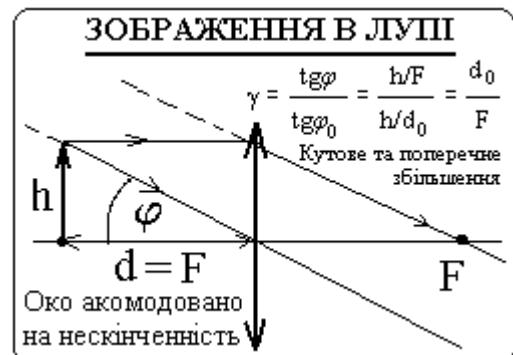
Кутове збільшення співпадає з лінійним.

2) Якщо око акомодоване на нескінченні то це означає, що предмет поміщене в фокусі, а зображення нескінченно віддалене. В цьому випадку можна визначити лише кутове збільшення.

$$\gamma = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0} = \frac{h/F}{h/d_0} = \frac{d_0}{F}$$

Отримане збільшення відповідає вищерозрахованому.

Аналіз формули збільшення показує, його оберненопропорційну залежність від фокусної відстані. Одночасно зрозуміло, що зменшуючи фокусної відстані супроводжується зменшенням радіуса кривизни лупи, що тягне за собою зменшення її розмірів, або збільшення товщини, і як наслідок, спотворень зображення. Крім того при малій фокусній відстані лупу треба наблизити майже впритул до предмета спостереження, що зменшує освітленість предмета. З цих та інших причин використовуються лупи, які дають збільшення в 5 – 10 разів.



### 4. Мікроскоп

Мікроскоп складається із зверненого до предмета спостереження об'єктива – системи лінз, яка діє, як короткофокусна лінза, і окуляра, зверненого до ока спостерігача який діє, як довгофокусна лупа. Зв'язок поперечного збільшення мікроскопа

## Плюшай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

$$\Gamma = \frac{H}{h}$$

з поперечними збільшеннями об'єктива

$$\Gamma_{\text{об}} = \frac{h'}{h}$$

та окуляра

$$\Gamma_{\text{ок}} = \frac{H}{h'}$$

очевидний

$$\Gamma = \Gamma_{\text{об}} \Gamma_{\text{ок}}.$$

Збільшення об'єктива за формулою лінзи становитиме

$$\Gamma_{\text{об}} = \frac{f_{\text{об}}}{d_{\text{об}}}.$$

Оскільки проміжне зображення знаходитьться поблизу фокуса окуляра, а величиною фокусної відстані об'єктива в порівнянні з відстанню між фокусами можна знехтувати, то відстань до проміжного зображення можна вважати рівною відстані між фокусами об'єктива і окуляра  $\delta$ , яка називається довжиною тубуса мікроскопа. Врахувавши те, що предмет розташовується майже в фокусі об'єктива, отримаємо

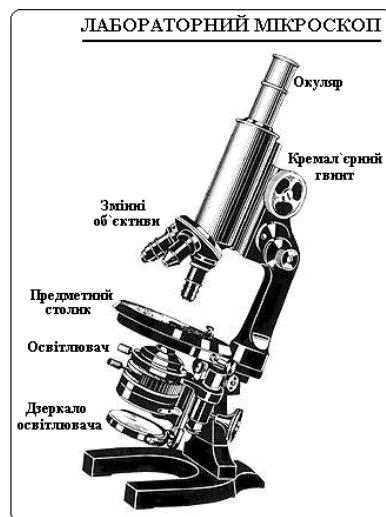
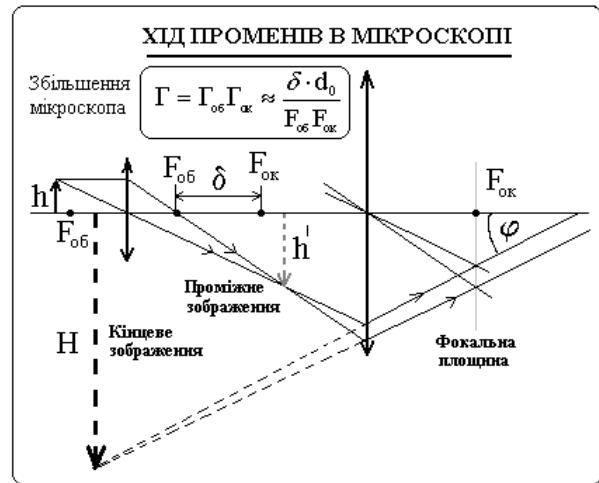
$$\Gamma_{\text{об}} \approx \frac{\delta}{F_{\text{ок}}}.$$

Для збільшення окуляра, який діє як лупа у випадку ока акомодованого на відстань найкращого зору, матимемо

$$\Gamma_{\text{ок}} = \frac{f_{\text{ок}}}{d_{\text{ок}}} \approx \frac{d_0}{F_{\text{ок}}}.$$

Збільшення мікроскопа

$$\Gamma = \Gamma_{\text{об}} \Gamma_{\text{ок}} \approx \frac{\delta \cdot d_0}{F_{\text{об}} F_{\text{ок}}}.$$



### 5. Зорова труба (телескоп)

Зорова труба створює можливість розгляду віддалених об'єктів, за рахунок того, що за її допомогою дві довільні точки розглядуваного предмета спостерігаються під більшим кутом і не зливаються в одну, як при спостереженні неозброєним оком.

Зорова труба, яка використовується для спостереження за небесними об'єктами називається *телескопом*. Лінзний телескоп, в якому зображення формується завдяки явищу заломлення (рефракції) світла, називають *рефрактором*.

Найпростіша зорова труба є комбінацією двох лінз, які забезпечують кутове збільшення – об'єктива, зверненого до об'єкта спостережень, та зверненого до ока окуляра. В дійсності роль об'єктива і окуляра відіграють досить складні системи лінз.

#### $1^0$ Труба Кеплера

Один з варіантів зорової труби складається з двох збиральних лінз з суміщеннями фокусами, серед яких фокусна відстань об'єктива значно перевищує фокусну відстань окуляра. Ця труба, носить назву труби Кеплера, на честь великого астронома Йоганна Кеплера, який застосовував її, як телескоп.

Знайдемо кутове збільшення  $\gamma$  труби Кеплера. Його можна означити відношенням кутів спостереження фіксованих точок в телескоп ( $\varphi$ ) і неозброєним оком ( $\varphi_0$ ). Однак, з врахуванням того, що для малих кутів  $\varphi \approx \sin \varphi \approx \tan \varphi$ , можна для зручності обчислень замість відношення кутів розглядати відношення їх тангенсів.

### ХІД ПРОМЕНІВ В ТРУБІ КЕПЛЕРА

Збільшення труби Кеплера

$$\gamma = \frac{\tg \varphi}{\tg \varphi_0} = \frac{H/F_{\text{ок}}}{H/F_{\text{об}}} = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}$$

Труба Кеплера дає можливість спостерігати дві точки під більшим кутом, забезпечуючи кутове збільшення

$$\gamma = \frac{\tg \varphi}{\tg \varphi_0} = \frac{H/F_{\text{ок}}}{H/F_{\text{об}}} = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}$$

З двох труб Кеплера можна утворити *бінокль*. Оскільки труба Кеплера дає обернене зображення, в біноклях встановлюють оборотні призми.

#### *2<sup>0</sup> Труба Галілея*

В іншому варіанті зорової трубы, названої на честь Галілея, який біля 1609 – 10 рр. вперше використав її в якості телескопа, об’єктивом служить збиральна лінза, окуляром – розсіювальна. Задній фокус об’єктива суміщений зі заднім фокусом окуляра.

З побудови ходу променя видно, що кутове збільшення трубы Галілея

### ХІД ПРОМЕНІВ В ТРУВІ ГАЛЛЛЕЯ

Збільшення труби Галілея

$$\gamma = \frac{\tg \varphi}{\tg \varphi_0} = \frac{H/F_{\text{ок}}}{H/F_{\text{об}}} = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}$$

Фокальна площа

$$\gamma = \frac{\tg \varphi}{\tg \varphi_0} = \frac{H/F_{\text{ок}}}{H/F_{\text{об}}} = \frac{F_{\text{об}}}{F_{\text{ок}}}.$$

Зрозуміло, чому зорову трубу (телескоп) вигідно складати з довгофокусного об’єктива і короткофокусного окуляра.

Довгофокусний об’єктив повинен містити лінзу великого діаметра, яку надзвичайно важко виготовити та відшліфувати. Крім того така лінза своєю вагою помітно деформує трубу телескопа. Тому рекордний діаметр лінзи об’єктива телескопа становить 103 см. Оскільки яскравість зображення залежить від ширини



## Плющай І.І. ЕЛЕМЕНТАРНА ОПТИКА

світлового пучка, який попадає в телескоп, то кращі можливості мають дзеркальні *телескопи – рефлектори*, світлоприймачем в яких служить увігнуте дзеркало. В сучасний момент звичним діаметром дзеркал таких телескопів стали 8 - 10 м, а в найближчому майбутньому планується реалізація проектів рефлекторів з діаметром дзеркала 30 м і навіть 100м.

Література

- [1]. Глава II
- [2]. §113 – 114.