

Оптичні методи і засоби в галузі

Оптичні елементи зі сферичними поверхнями

Лінзи

Параксіальний пучок – пучок променів, спрямований до оптичної осі оптичної системи під дуже малим кутом.

Особливість заломлених променів на сферичній поверхні: для параксіальних променів положення точки зображення не залежить від кутів, під якими йдуть падаючі на сферичну поверхню промені. Тобто *гомоцентричний параксіальний пучок променів після заломлення на сферичній поверхні залишається гомоцентричним. При цьому кожній точці у просторі відповідає цілком певна (спряжена) точка у просторі зображень.*

Одним з найпоширеніших серед оптичних елементів зі сферичними поверхнями є лінзи, зокрема тонкі.

Лінза – деталь з прозорого матеріалу (зазвичай скла), обмежена від навколишнього середовища (повітря) двома сферичними поверхнями з радіусами r_1, r_2 .

Лінзи поділяють на збиральні (додатні): двовипуклі ($r_1 > 0, r_2 < 0$),
плосковипуклі ($r_1 = \infty, r_2 < 0$), додатні меніски ($r_1 > 0, r_2 < 0, |r_1| < |r_2|$)
та розсіювальні (від'ємні): двовгнуті ($r_1 < 0, r_2 < 0$), плосковгнуті
($r_1 = \infty, r_2 > 0$), від'ємні меніски ($r_1 > 0, r_2 > 0, |r_1| > |r_2|$).

Лінзи

За допомогою лінзи колімований (паралельний) пучок фокусується у точку. Всі промені у цьому пучку проходять паралельно до осі лінзи і збагаються в одній точці – **фокусі**. Відстань від цієї точки до лінзи називають **фокусною відстанню** лінзи f і пов'язана з параметрами лінзи так

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad (*)$$

n – коефіцієнт заломлення матеріалу лінзи.

Відношення f/D (D – діаметр лінзи) називають фокусне число лінзи. Для отримання малої фокусної відстані лінза повинна мати дуже малий діаметр, що спричиняє явище сферичної аберації (у точці фокусу виникає сильно “розмита пляма”). Щоб усунути цю проблему, більшість лінз виготовляють з малим фокусним числом $f/D > 0,5$.

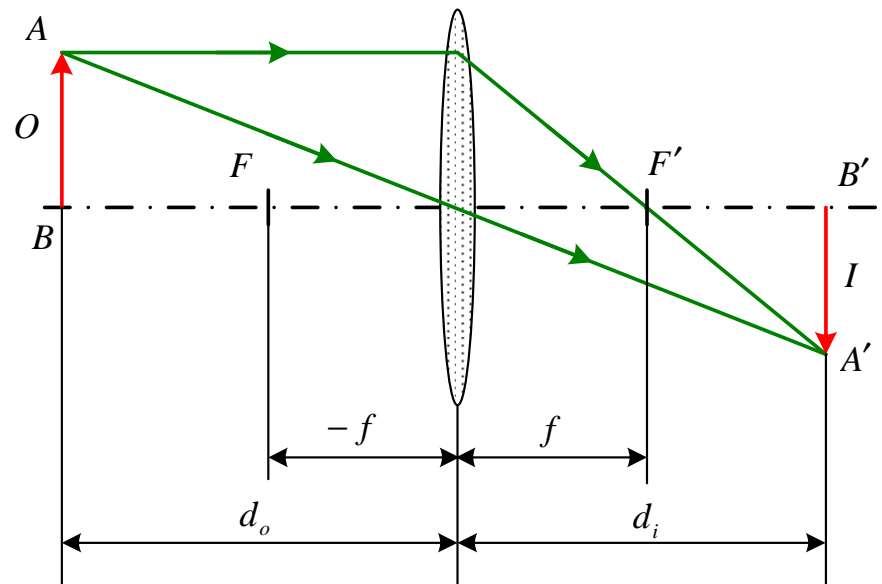
Нехай d_o – відстань від лінзи до об'єкта, d_i – відстань від лінзи до зображення.

Лінзи

Тонка лінза - [варіант визначення] лінза, товщина якої мала порівняно з відстанями d_o , d_i ;

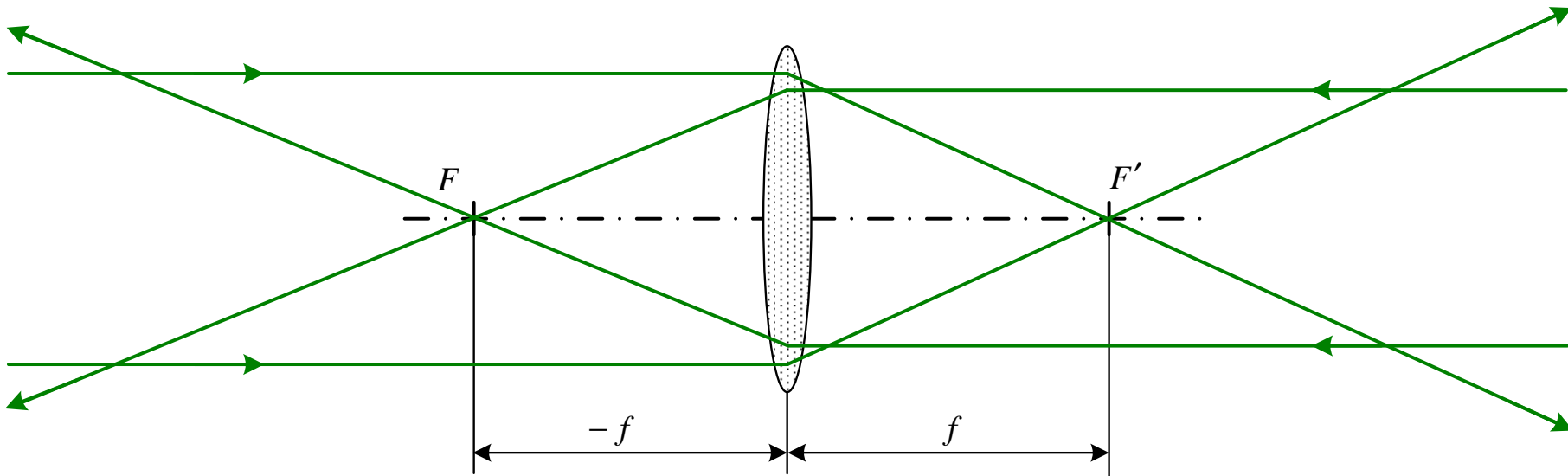
[варіант визначення] лінза, товщина якої настільки мала, що зміщення променя є дуже незначним.

Положення зображення знаходять побутовою траєкторій променів, що йдуть від кінця предмета. Один промінь іде через центр лінзи і не відхиляється. Інший промінь йде паралельно до осі лінзи і проходить через точку фокусу після виходу з лінзи. Перетин траєкторій цих двох променів визначає точку зображення, що відповідає кінцевій точці предмета (рисунок).



Лінзи

Якщо об'єкт розташувати у нескінченності ($d_o = \infty$), то промені зйдуться у точці F' . Якщо ж об'єкт розташувати праворуч у нескінченності ($d_i = \infty$), то його зображення отримаємо ліворуч у точці F . Точки F , F' називають відповідно переднім та заднім фокусами.



Лінзи

Відстань між предметом та сфокусованим зображенням визначають за допомогою **рівняння тонкої лінзи**

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f},$$

яке з урахуванням (*) набуває вигляду

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right).$$

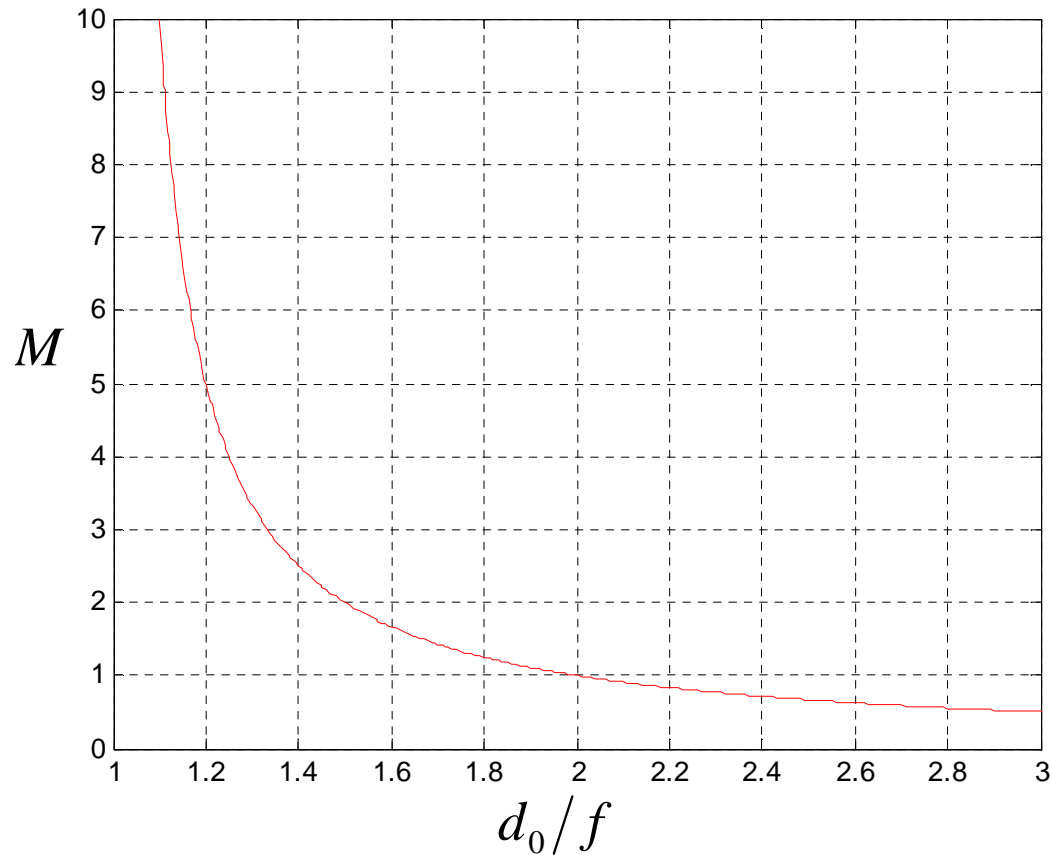
Відношення розмірів зображення та об'єкта називають **коефіцієнт збільшення**

$$M = \frac{d_i}{d_o}.$$

Лінзи

Місцеположення предмета d_o і сфокусованого зображення d_i пов'язані між собою рівнянням тонкої лінзи. Звідси

$$M = \frac{1}{\frac{d_o}{f} - 1}.$$



Для значень збільшень лінзи, більших одиниці, область відстаней до предмета має бути в інтервалі

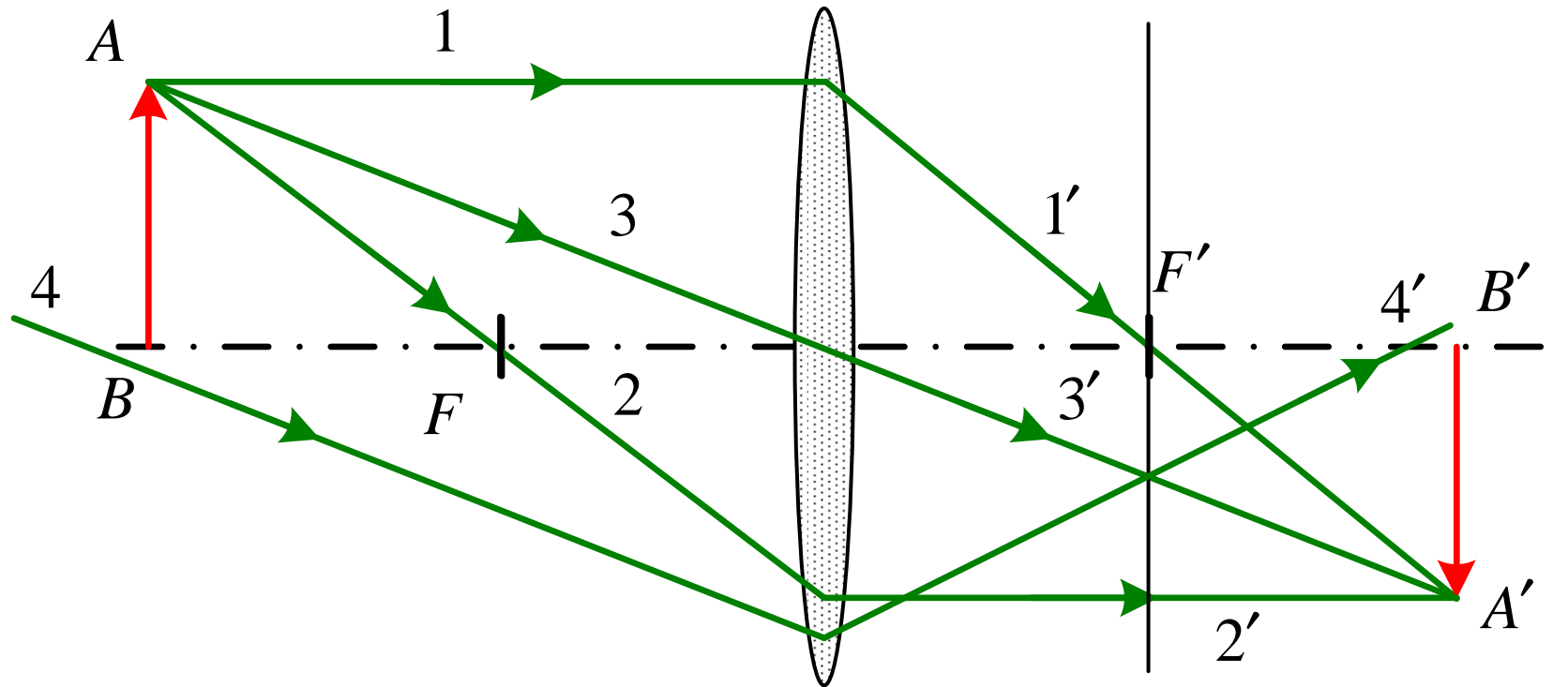
$$1 < d_o/f < 2$$

Лінзи

У таблиці наведено характеристики зображень у чотирьох зонах для збиральних та розсіювальних лінз.

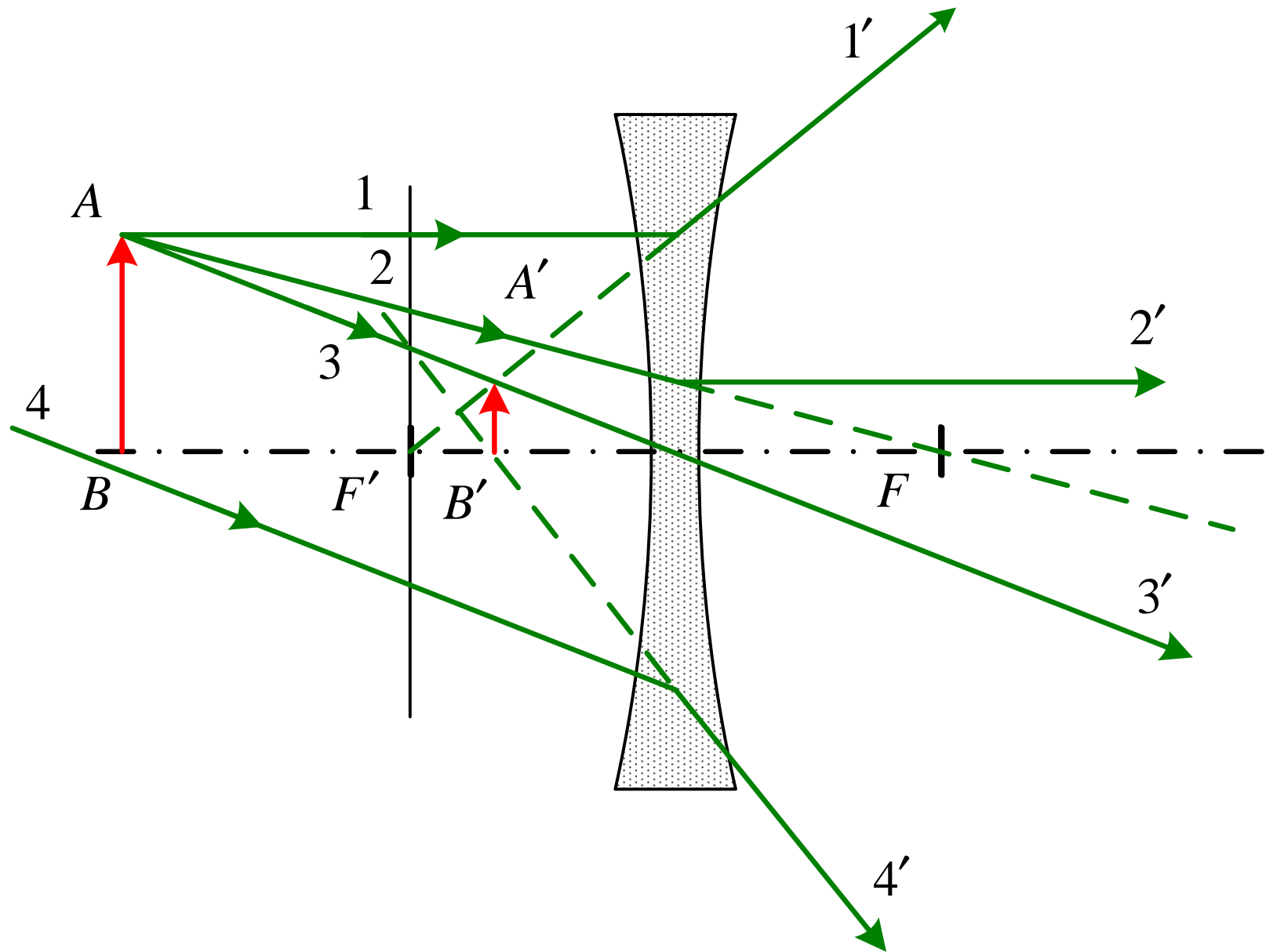
| Тип лінз | Зона у просторі предметів | Зона у просторі зображень | Характеристика зображень |
|--------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Збиральні | $-\infty \div -2F$ | $F' \div 2F'$ | Дійсне, обернене, зменшене |
| | $-2F \div -F$ | $2F' \div \infty$ | Дійсне, обернене, збільшене |
| | $-F \div 0$ | $-\infty \div 0$ | Уявне, пряме, збільшене |
| | $0 \div \infty$ | $0 \div F'$ | Дійсне, пряме, зменшене |
| Розсіювальні | $-\infty \div 0$ | $F' \div 0$ | Уявне, пряме, зменшене |
| | $0 \div F$ | $0 \div \infty$ | Дійсне, пряме, збільшене |
| | $F \div 2F$ | $-\infty \div -2F'$ | Уявне, обернене, збільшене |
| | $2F \div \infty$ | $-2F' \div -F'$ | Уявне, обернене, зменшене |

Лінзи



Хід променів та побудова зображення у збиральній лінзі

Лінзи



Хід променів та побудова зображення у розсіювальній лінзі

Лінзи

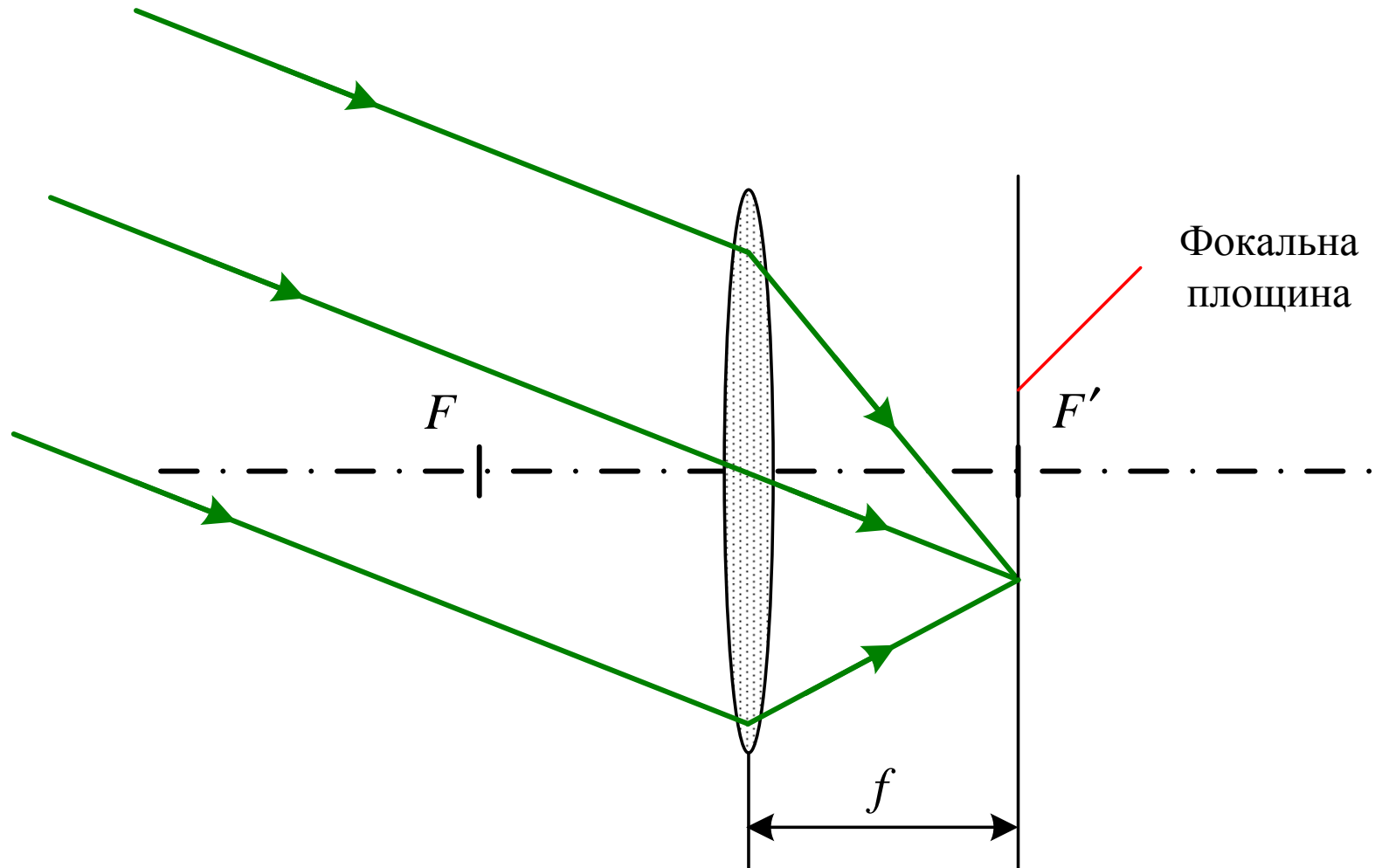
Траєкторія променів, що проходять через лінзу:

- промінь 1-1', що падає на лінзу паралельно до її осі, проходить через точку F' ;
- промінь 2-2', який проходить через точку F до лінзи та йде паралельно до осі після лінзи;
- промінь 3-3', який проходить через центр лінзи без зміни свого напрямку;
- промінь 4-4', що падає на лінзу паралельно до центрального променя, та перетинається з ним у фокальній площині після проходження крізь лінзу.

Положення та розміри ідеального зображення можна знайти графічно шляхом побудови ходу будь-яких двох променів.

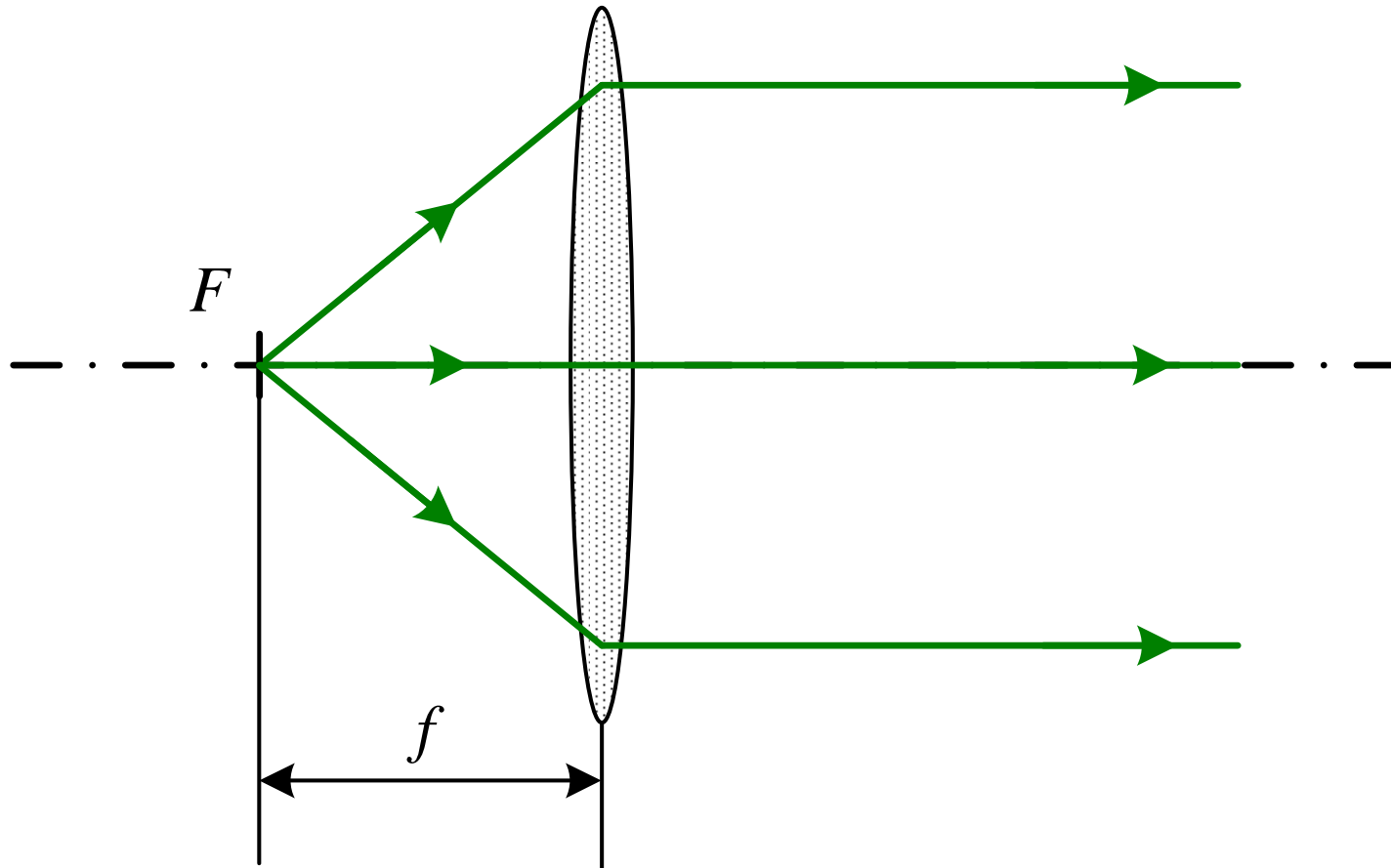
Лінзи

Кілька практичних ілюстрацій



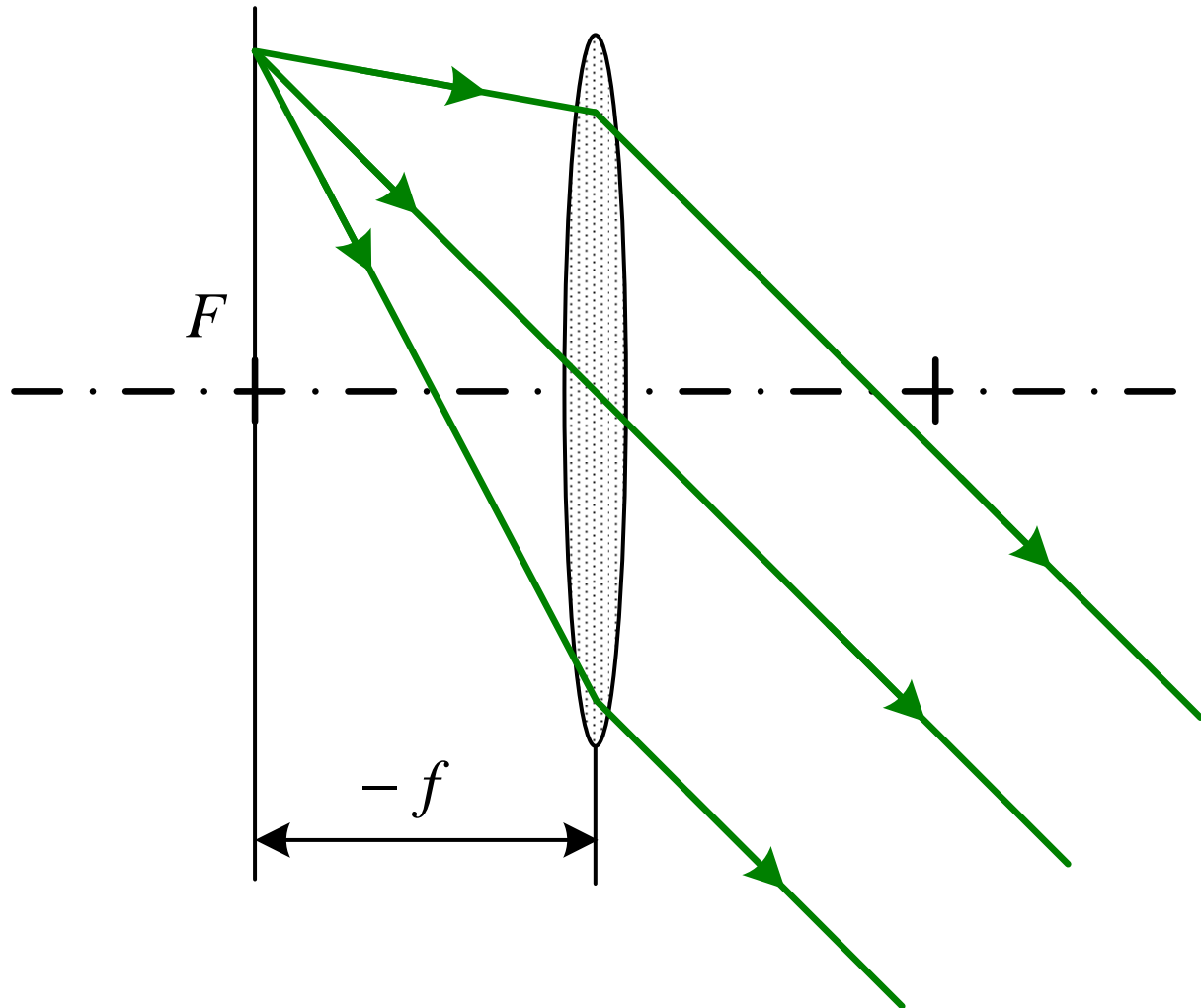
Фокусування паралельних променів, що падають під кутом до осі лінзи, у фокальній площині

Лінзи



Колімування тонкого пучка точкового джерела, що знаходиться на осі лінзи

Лінзи

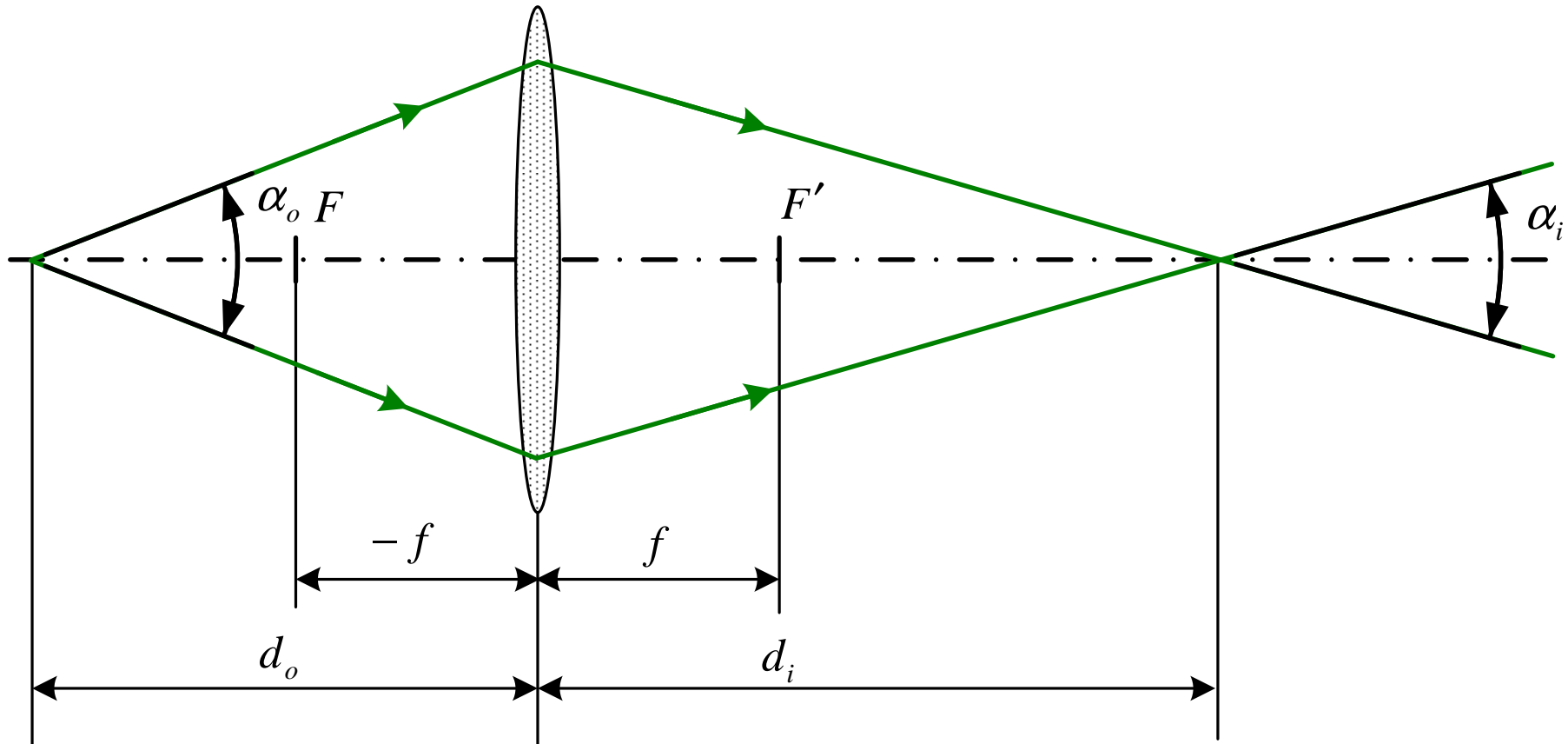


Колімування пучка точкового джерела, що не знаходиться на осі лінзи

Числова апертура

Числова апертура

При використанні лінз для введення світла у волокно важливо стежити за кутами, під якими йдуть промені світла – рисунок.



Зміна кутового розходження світла за допомогою лінзи

Числова апертура

З наведеного рисунка видно, що кут розширення пучка світла α_o і результуючий кут розширення пучка світла зображення α_i для точкового предмета, що знаходиться на осі лінзи, різні!

Рівняння тонкої лінзи дає змогу розрахувати положення зображення у термінах відстані до об'єкта і фокусної відстані лінзи. Використовуючи тригонометричні формули, маємо таке співвідношення кутів:

$$\frac{\operatorname{tg}(\alpha_i/2)}{\operatorname{tg}(\alpha_o/2)} = \frac{1}{M}.$$

Відомо, що за малих кутів тангенс цього кута дорівнює самому куту. Ця апроксимація досить точна ($\delta \leq 4\%$) для кутів $0 \dots 20^\circ$ (до 0,35 рад). Звідси

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_o} = \frac{1}{M} \Rightarrow \alpha_o = \alpha_i M \Rightarrow \alpha_i = \frac{\alpha_o}{M}.$$

Цей результат справедливий для $\alpha_{o,i} \leq 40^\circ$

Числова апертура

З отриманих співвідношень випливає, що: **збільшення розміру предмета α_o при збільшенні коефіцієнта збільшення лінзи M супроводжується зменшенням кута розширення пучка α_i .**
Зображення, що створюється лінзою, має тенденцію до колімування променів світла, що виходять з об'єкта.

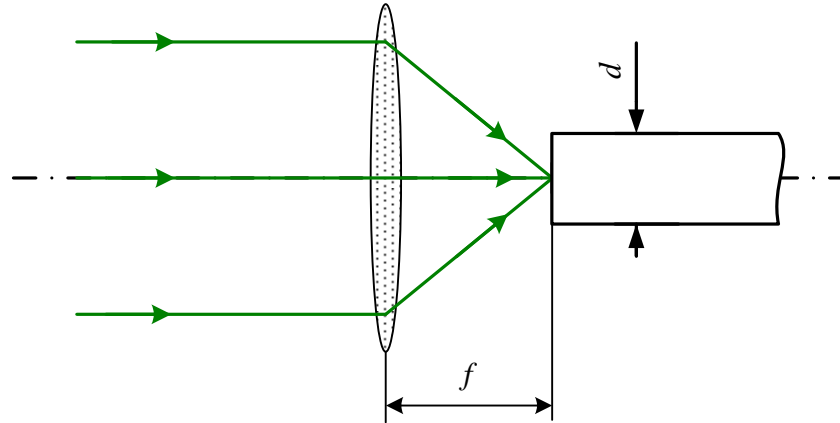
Практичний аспект цього результату:

оскільки кути випромінювання лазерних діодів і світлодіодів великі, а світло вводиться у волокна тільки під малими кутами, лінзи можуть збільшувати ефективність введення світла від джерел у волокна.

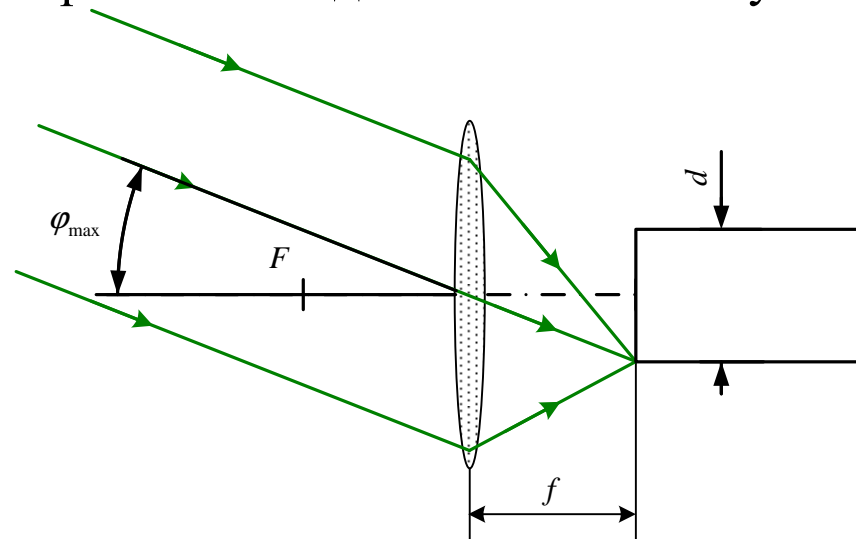
Числова апертура

Оптична частина оптичного приймального пристрою, що складається з лінзи та фотоприймача. Має місце три характерні ситуації:

- світловий пучок паралельний до осі лінзи:

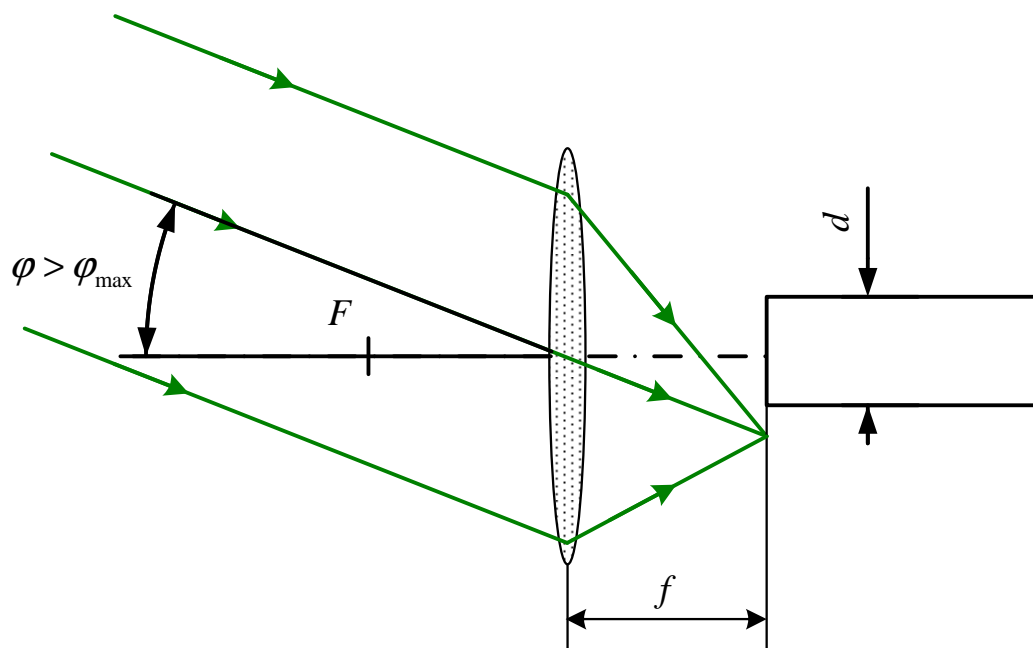


- світловий пучок спрямовано під максимальним кутом прийому:



Числова апертура

- світловий пучок спрямовано під кутом більшим за максимальний кут прийому:



Діаметр лінзи значно більший за діаметр апертури приймача, тому лінза “перехоплює” більшу кількість променів порівняно з приймачем без лінзи. Остання фокусує світло на апертуру приймача. Спільне використання лінзи і приймача створює ефективнішу систему збирання променів.

Числова апертура

Максимальний кут прийому (апертурний кут) (якщо між лінзою і приймачем повітря):

$$\varphi_{\max} = \operatorname{arctg} \frac{d}{2f}$$

Оскільки приймач має колову симетрію, він приймає світло всередині уявного конуса, кут розкриття якого становить $\varphi = 2\varphi_{\max}$.

Числова апертура NA (numeric aperture):

$$NA = n_0 \sin \varphi,$$

n_0 – коефіцієнт заломлення матеріалу між лінзою та приймачем; φ – максимальний кут прийому (апертурний кут).

Це визначення справедливе для всіх систем, які збирають світло, з оптоволоконном включно.

Зверніть увагу: якщо світло вводять в оптоволоконно, то максимальний кут прийому (апертурний кут) – це кут повного внутрішнього відбиття!

Числова апертура

Як впливає з визначення числової апертури, **малі значення $NA \in [0,1 \dots 0,3]$ відповідають малим кутам прийому (у випадку повітря).** Тому з'єднувати між собою низькоапертурні волокна складніше – наявна сильна залежність від умов механічного стикування, та ще й передача світла світла менш ефективна (деякі промені проходять поза кутом прийому волокна). Для зменшення кута розходження пучка та відповідного покращання ефективності з'єднання можна використовувати лінзи.

Типові оптоволокна, розроблені для дальнього зв'язку, мають значення $NA \in [0,1 \dots 0,3]$. Малі значення NA зменшують ефективність введення світла, але збільшують ширину смуги пропускання оптоволокна.

Полімерні волокна частіше, ніж скляні, використовують для передачі на короткі відстані. *Дальність передачі тут обмежена великим затуханням у полімерних матеріалах. Полімерні волокна виготовляють із великим значенням NA (зазвичай $0,4 \dots 0,5$), щоб збільшити ефективність введення світла, що частково компенсує великі втрати при поширенні світла.*