

Оптичні методи і засоби в галузі

Основні особливості оптичних систем

Основні закони геометричної оптики

Все різноманіття оптичних явищ, пов'язаних з поширенням світла у різних середовищах, достатньо повно описують закони хвильової оптики.

Але!

При конструюванні оптичних приладів та їхньому практичному використанні багато задач можна розв'язати простіше, використовуючи поняття *геометричної оптики*.

Основними образами у геометричній оптиці є *світні точки, світлові промені та світлові пучки*.

Ці образи є математичними, а не фізичними!

Світловий промінь – геометрична лінія, яка визначає напрям поширення світла.

Світна точка – геометрична точка перетину двох променів.

Світловий пучок – сукупність світлових променів.

Основні закони геометричної оптики

Світловий пучок, який складається з променів, які проходять через одну точку, або які виходять з однієї точки, називають *гомоцентричним*. Східні' гомоцентричні пучки утворюють світну точку. З іншої сторони, кожна світна точка є джерелом розбіжного світлового пучка. Нескінченно віддалена точка є джерелом паралельного світлового пучка.

В основі геометричної оптики лежать закони прямолінійності поширення, незалежності, відбиття та заломлення світлових променів.

Закон прямолінійності поширення світлових променів стверджує, що поширення променів в оптично однорідному середовищі відбувається прямолінійно. У *законі незалежності світлових променів* вважається, що окремі промені не впливають один на одного, та поширюються незалежно один від одного. Проте дія закону прямолінійності обмежується дифракційними явищами, а дія закону незалежності – нелінійними явищами.

Якщо промінь світла зустрічає на своєму шляху границю розподілу двох середовищ, то промінь розпадається на два променя – відбитий та заломлений, які підпорядковуються *законам відбиття та заломлення* (перший та другий закони Снеліуса відповідно).

**Основні визначення та поняття, пов'язані з
оптичними системами**

Основні визначення та поняття в оптичних системах

Оптична система (ОС) – сукупність заломлюючих та відбиваючих поверхонь, яка здатна створювати оптичне зображення.

Практично ОС складається з найпростіших оптичних елементів (лінз, призм, дзеркал тощо), розділених повітряними проміжками.

ОС відносять до:

класу *діоптричних* чи *лінзових*, якщо містять лише заломлюючі поверхні;

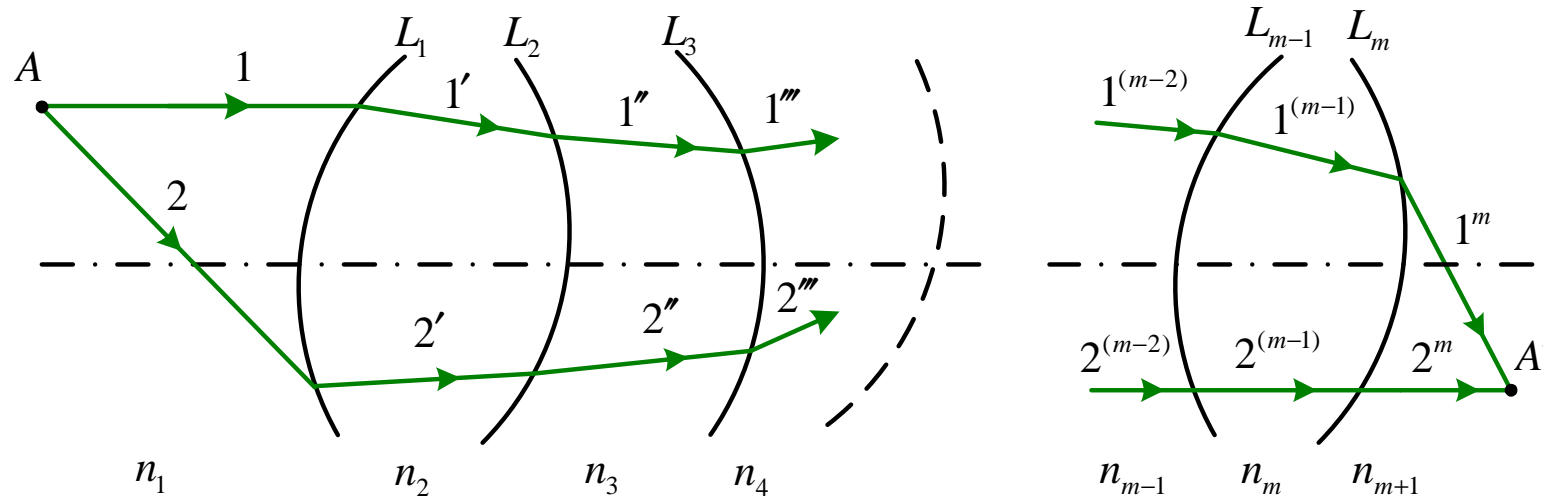
до класу *катоптричних* чи *дзеркальних*, якщо містить лише відбиваючі поверхні;

до класу *катадіоптричних* чи *дзеркально-лінзових*, якщо містить як заломлюючі, так і відбиваючі елементи.

Відбиваючі та заломлюючі поверхні ОС зазвичай є поверхнями обертання. У більшості випадків ці поверхні є сферичними. *У просторі поверхні розташовано зазвичай таким чином, що центри їхньої кривизни перебувають на одній прямій лінії – оптичній осі ОС.* Такі ОС називають *центрованими*.

Основні визначення та поняття в оптичних системах

Розглянемо деяку центровану ОС, яка складається з деякої сукупності поверхонь $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{m-1}, L_m$, які розділяють середовища з показниками заломлення $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m, n_{m+1}$.



Загальна схема центрованої оптичної системи

Світна точка A є джерелом променів, які надходять до ОС. Застосовуючи закони заломлення (відбиття) на поверхні L_1 , потім на L_2, L_3 і т. д., можна визначити хід променів після проходження останньої поверхні

L_m , тобто на виході ОС. За певних умов промені, які виходять з точки A , після проходження ОС, залишаться гомоцентричними та зберуться у точці A' , яка є зображенням точки A .

Основні визначення та поняття в оптичних системах

Точки об'єкта та відповідні їм точки зображення називають **спряженими**. Лініям і поверхням об'єктів відповідають спряжені з ними зображення ліній і поверхонь на виході ОС.

Простір, у якому можуть перебувати точки та інші елементи об'єктів, називають **простором предметів**; простір, у якому перебувають зображення точок та інших елементів зображень – **простором зображень**. У загальному випадку простори предметів і зображень суміщені та заповнюють реальний тривимірний простір. Оптичні системи, які створюють точкові (стигматичні) зображення точок і геометрично подібні зображення лінійних і поверхневих елементів об'єктів, перпендикулярних до оптичної осі, називають **ідеальними**. Близькими до ідеальних є ОС, які працюють у параксіальній області, коли промені світлових пучків складають малий кут з оптичною віссю.

Основні визначення та поняття в оптичних системах

Залежно від параметрів ОС та характеру вхідних до неї світлових пусків, об'єкти та їхні зображення можуть бути дійсними чи уявними (рисунок на наст. слайді).

Дійсний об'єкт – це точка, яка є джерелом розбіжних променів.

Дійсне зображення – точка сходження вихідних з ОС променів.

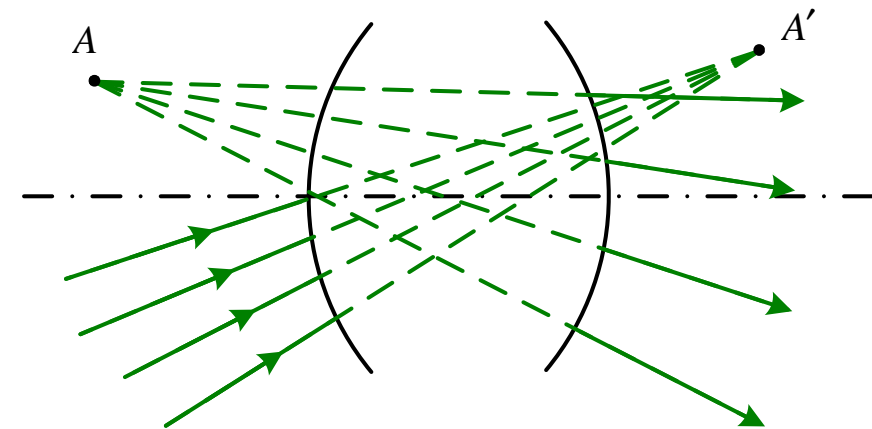
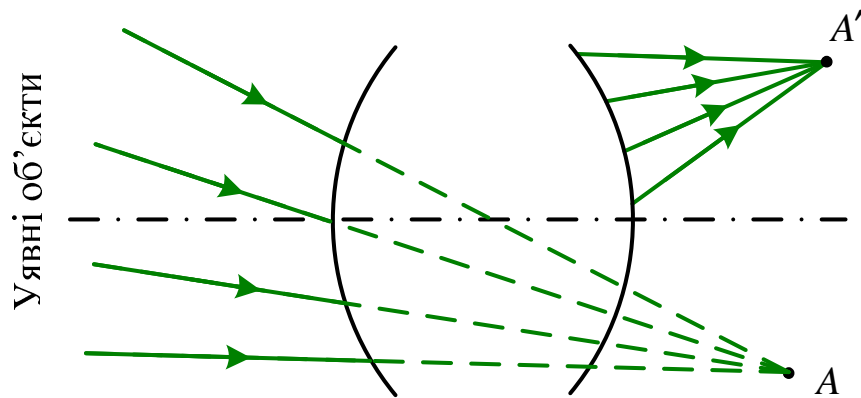
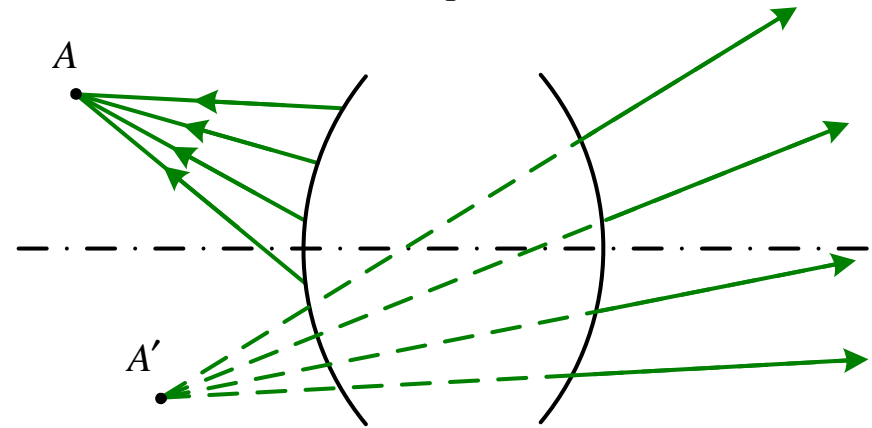
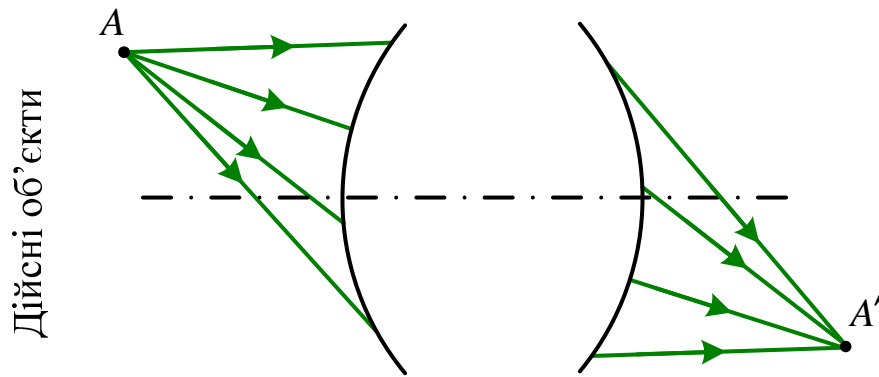
Уявний об'єкт – точка, утворена шляхом проходження розбіжних на вході ОС променів.

Уявне зображення – точка, утворена шляхом продовження (у зворотному напрямі) розбіжного вихідного з ОС пучка променів.

Основні визначення та поняття в оптичних системах

Дійсні зображення

Уявні зображення



Характеристики об'єктів і зображень

Основні визначення та поняття в оптичних системах

При аналізі та розрахунках ОС зазвичай використовують такі правила:

1. за додатній напрям поширення світла прийнято напрям зліва направо. Тому вхідну поверхню зображають на рисунках ліворуч;
2. всі відрізки та відстані, які відкладають праворуч від опорної точки, лінії чи поверхні, вважають додатніми, а ті, які відкладають ліворуч – від'ємними. Для радіусів кривизни опорною є визначена ними сферична поверхня;
3. товщина оптичних елементів і відстані між ними вважають додатніми при прямому ході і від'ємними при зворотному ході світлових променів;
4. всі відрізки та відстані, які відраховують вгору від оптичної осі, вважають додатніми, а ті, які відраховують вниз від оптичної осі – від'ємними;
5. кути, які відраховують поворотом від опорної лінії (оптичної осі, нормалі тощо) за годинниковою стрілкою, вважають додатніми, поворотом проти годинникової стрілки – від'ємними;
6. показники заломлення середовищ вважають додатніми при прямому ході променів і від'ємними при зворотному ході променів.

**Плоскі дзеркала, плоскопаралельні пластинки та
призми**

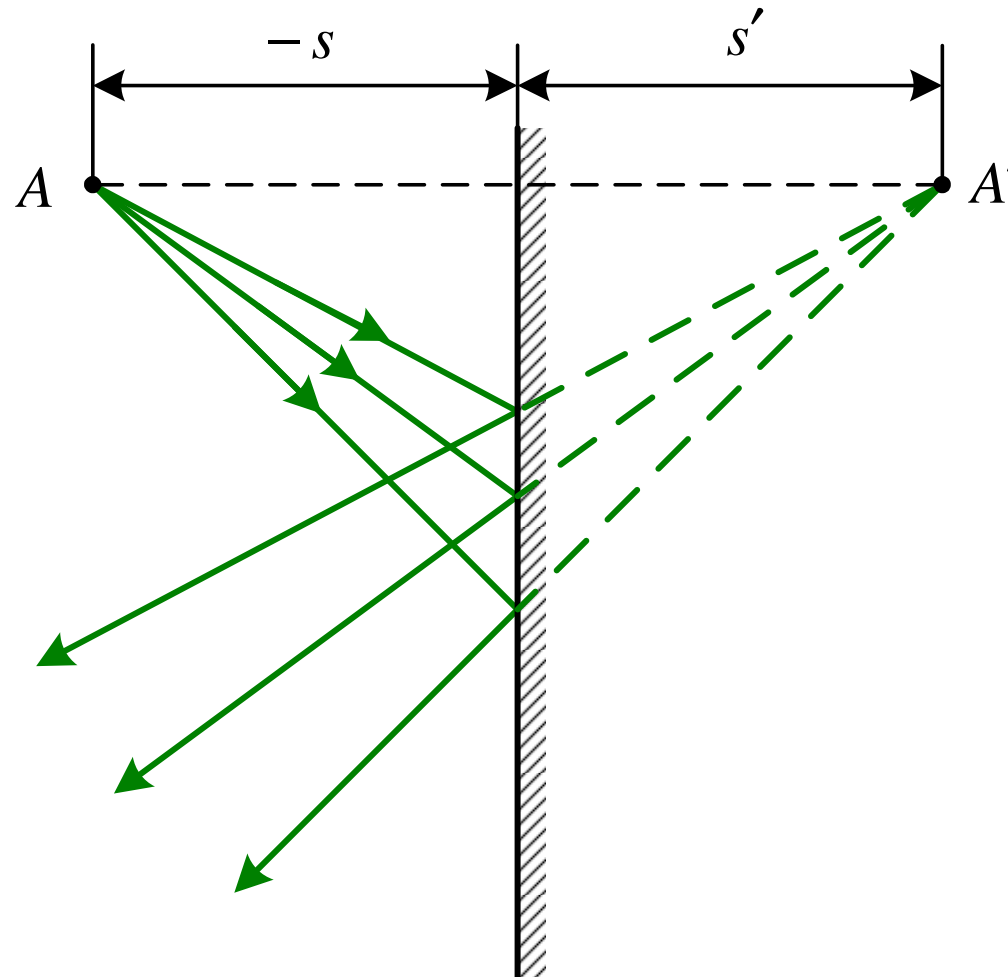
Плоскі дзеркала

Плоске дзеркало є добре відполірованою плоскою пластинкою, на поверхню якої нанесено відбиваючий шар. В оптичних системах плоскі дзеркала зазвичай виконують допоміжні функції: зміна напрямку поширення променів, розщеплення світлових променів, обертання зображення тощо.

Основні властивості плоских дзеркал проілюстровано на наступних слайдах.

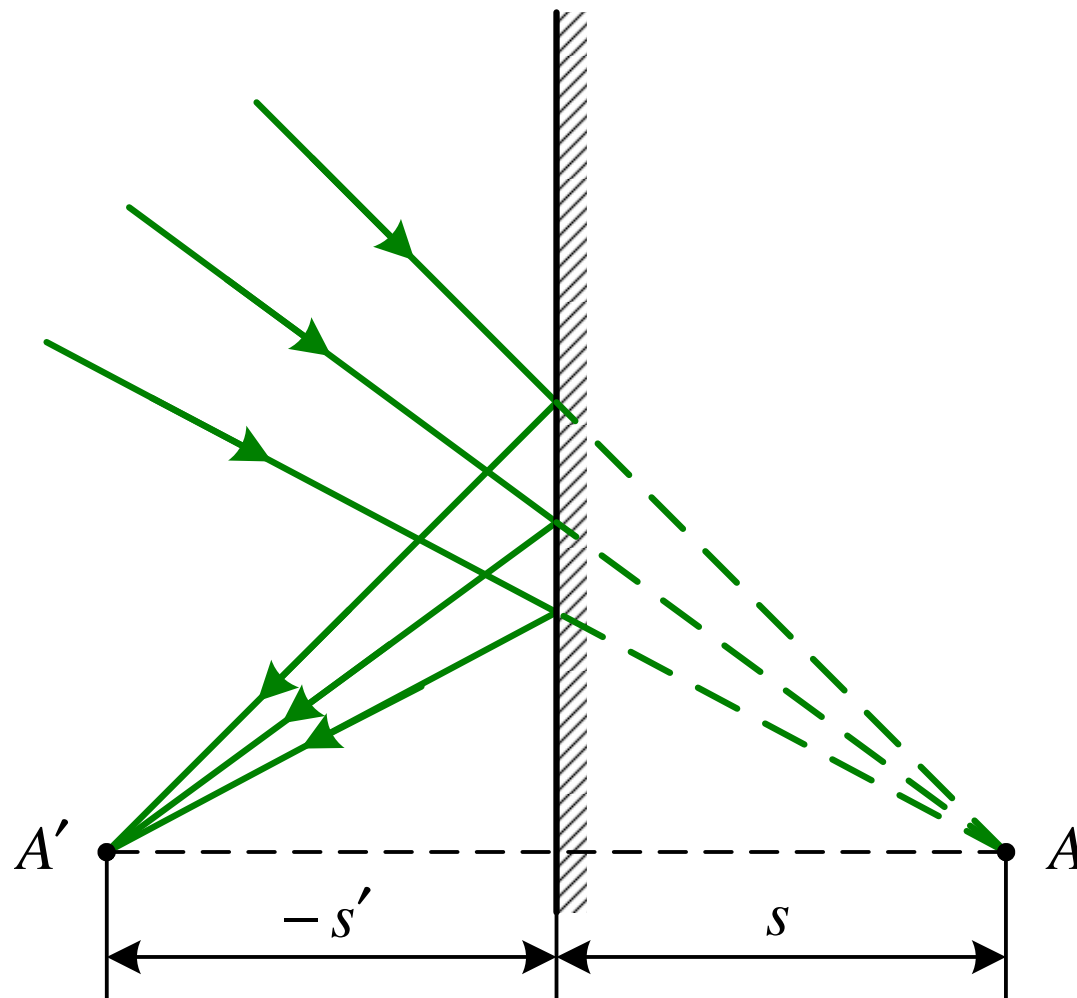
Основні властивості плоских дзеркал

Коли на плоске дзеркало зі світної точки A падає гомоцентричний пучок променів, то після відбиття промені пучка будуть поширюватись так, нібито вони виходили з точки A' , яка є уявним зображенням дійсної світної точки A .



Основні властивості плоских дзеркал

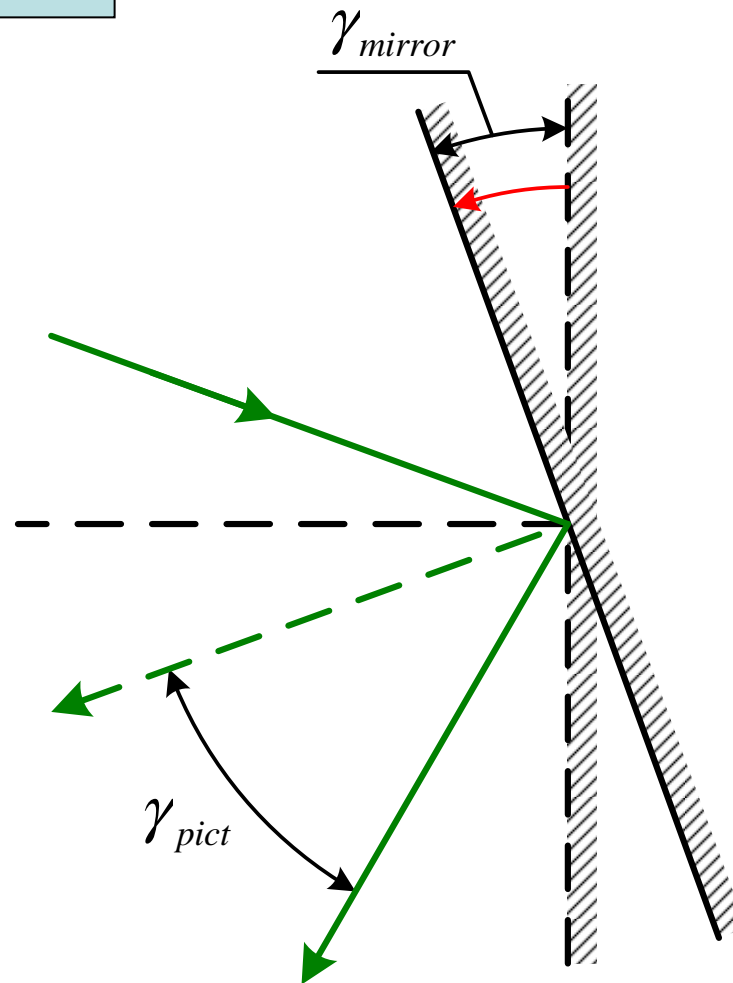
Якщо на плоске дзеркало падає збіжний гомоцентричний пучок променів, то після відбиття промені зберуться у точці A' , яка є дійсним зображенням уявної світної точки A .



Основні властивості плоских дзеркал

При повороті плоского дзеркала відбувається поворот зображення. Кут повороту зображення γ_{pict} дорівнює подвоєнному повороту дзеркала

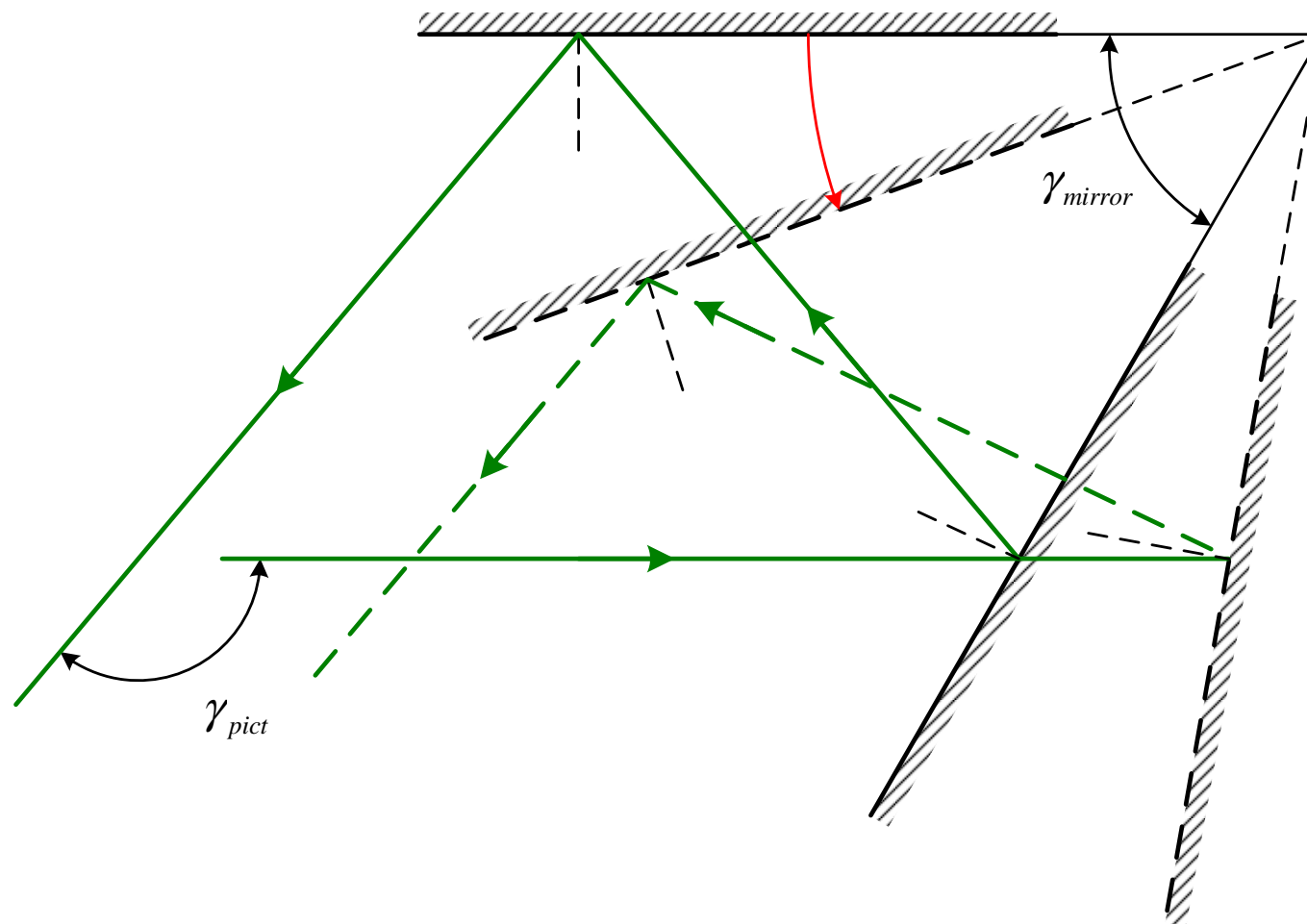
$$\gamma_{mirror} : \gamma_{pict} = 2\gamma_{mirror}.$$



Основні властивості плоских дзеркал

Система з двох дзеркал, які розташовано під кутом γ_{mirror} одне до одного, змінює напрям поширення променів на кут $\gamma_{pict} = 2\gamma_{mirror}$.

Поворот системи двох дзеркал навколо лінії перетину їхніх площин не змінює положення зображення.

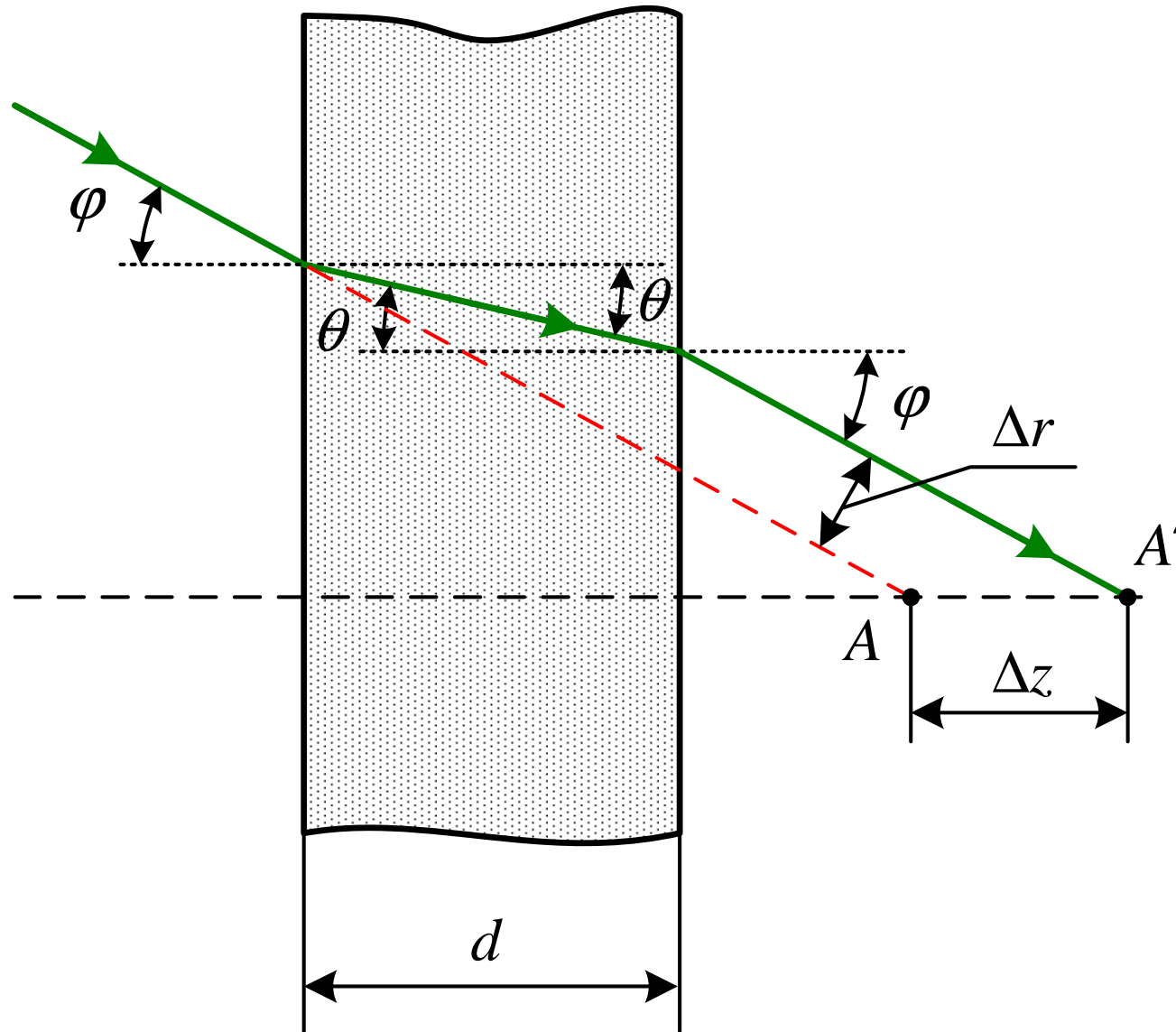


Плоскопаралельна пластинка

Плоскопаралельна пластинка є оптичним елементом, який складається з прозорого матеріалу (наприклад, скло), обмеженого паралельними площинами. Такі пластинки використовують в якості підкладки для різного роду тонких шарів (наприклад, світлоподільчих покриттів), захисних стекол, фільтрів та пристроїв зміщення зображень.

Основні властивості плоскопаралельної пластинки показано на наступних слайдах.

Основні властивості плоскопаралельної пластинки



Основні властивості плоскопаралельної пластинки

Основні властивості плоскопаралельної пластинки

Проходження похилого світлового пучка через плоскопаралельну пластинку супроводжується двома послідовними заломленнями – на кожній з границь розподілу повітря-скло. **Вихідний промінь йде паралельно до падаючого, але зі зміщенням у сторону.** Значення поперечного Δr та осьового (поздовжнього) Δz зміщень такі:

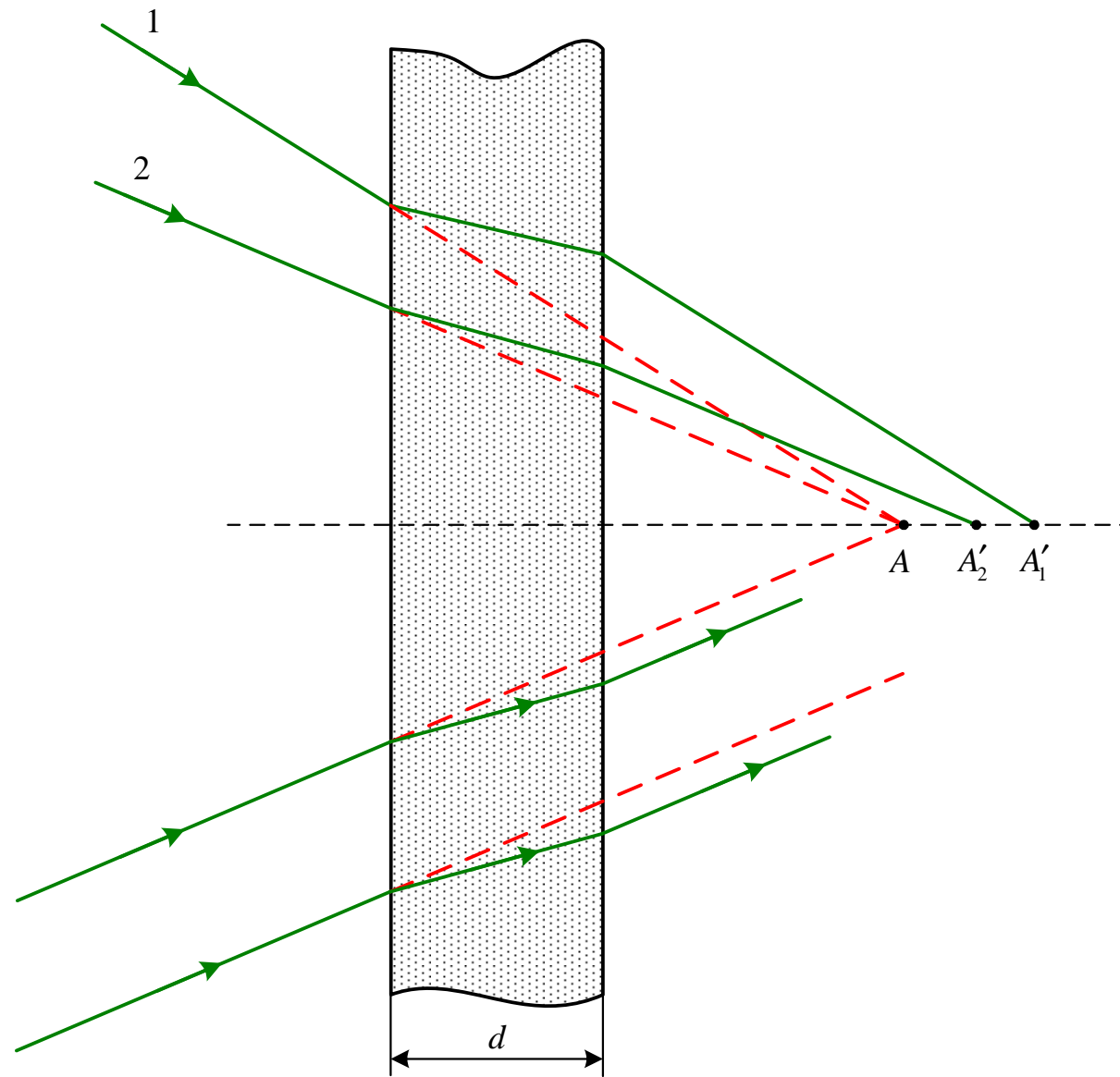
$$\Delta r = d \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\theta}{\varphi} \right) \sin \theta; \quad \Delta z = d \left(1 - \operatorname{tg} \frac{\theta}{\varphi} \right)$$

При малих кутах падіння для плоскопаралельної пластинки у повітрі $\operatorname{tg} \theta/\varphi \approx 1/n$ і строгі вирази спрощуються:

$$\Delta r \approx d \left(1 - \frac{1}{n} \right) \sin \theta; \quad \Delta z \approx d \left(1 - \frac{1}{n} \right),$$

де n – показник заломлення скла пластинки.

Основні властивості плоскопаралельної пластинки



Основні властивості плоскопаралельної пластинки

Основні властивості плоскопаралельної пластинки

Збіжні (конвергентні) чи розбіжні (дивергентні) гомоцентричні пучки після проходження крізь плоскопаралельну пластинку втрачають свою гомоцентричність.

Також паралельний пучок при проходженні через плоскопаралельну пластинку зберігає свою паралельність.

Призми

Призма – оптична деталь з прозорого матеріалу (зазвичай скла), обмеженого площинами, які утворюють між собою двогранні кути.

В оптичних системах призми використовують для зміни напрямку променів, світлорозщеплення, обертання зображення, а також для розкладання та поляризації світла.

Зазвичай призми бувають відбивальні, світлоподільчі, спектральні, поляризаційні тощо.

Найбільшого поширення набули відбивальні призми. Основними перевагами такими призм, порівняно із дзеркалами, є:

- краща стабільність взаємного положення відбиваючих поверхонь;
- менші втрати світла від граней з повним внутрішнім відбиттям;
- незалежність відбивальних властивостей від часу.

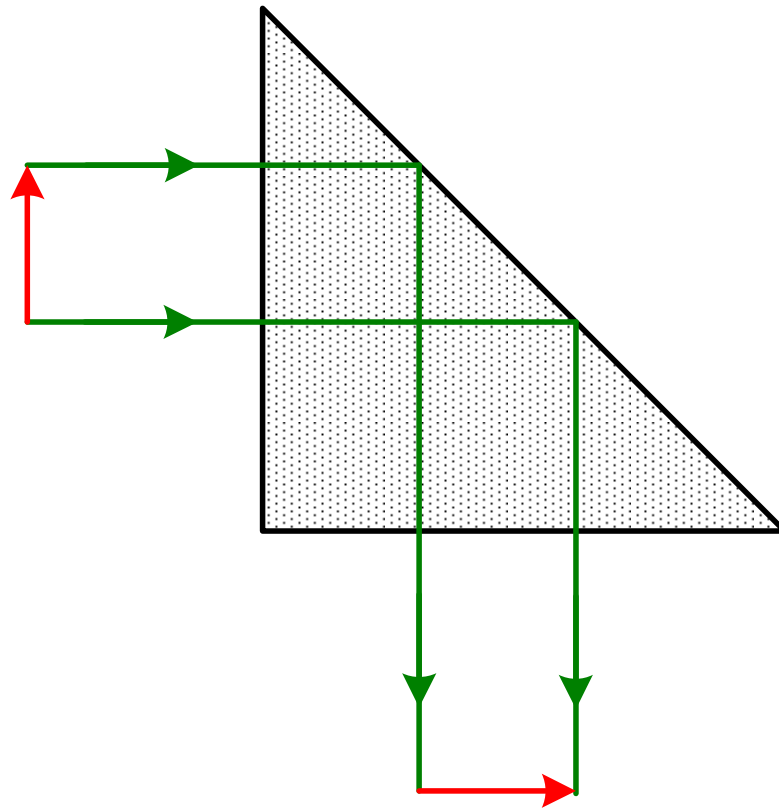
Відбиття від граней призми відбувається зазвичай за рахунок повного внутрішнього відбиття. Для пари “скло – повітря” значення кута повного відбиття $33^{\circ}30' \dots 42^{\circ}40'$ (при $n = 1,472 \dots 1,814$), зокрема $41,5^{\circ}$ для $n = 1,5$. Для пари “вода – повітря” значення цього кута становить $48^{\circ}50'$.

Схеми деяких відбивальних призм показано на наступних слайдах.

Прямокутна призма

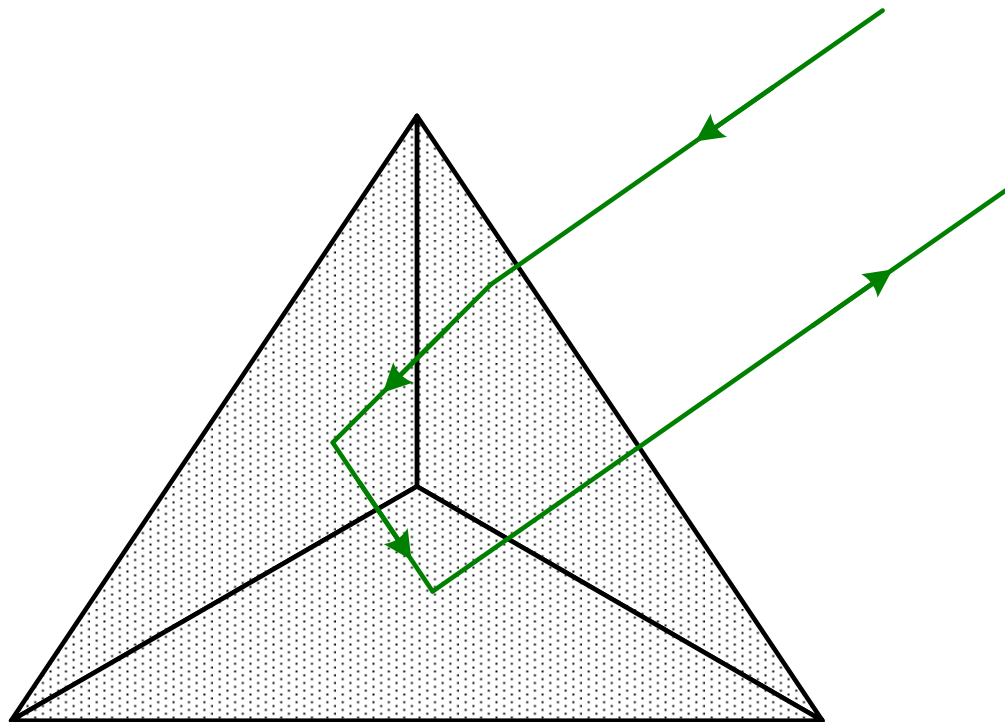
Якщо таку призму виконано зі скла, для якого, наприклад, при коефіцієнті заломлення 1,5 критичний кут відбиття $41,5^{\circ}$ то при куті відбиття 45° спостерігається повне відбиття.

Тому таку призму зручно використовувати для зміни напрямку оптичних променів.

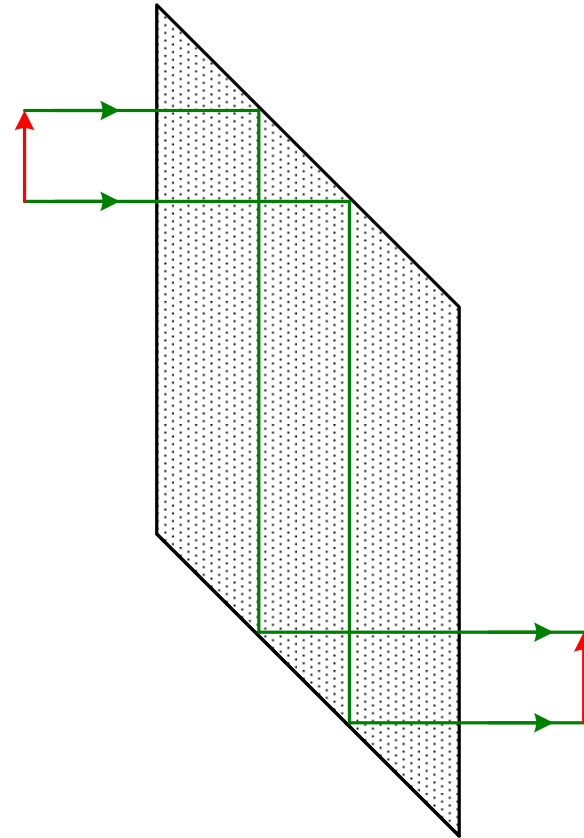
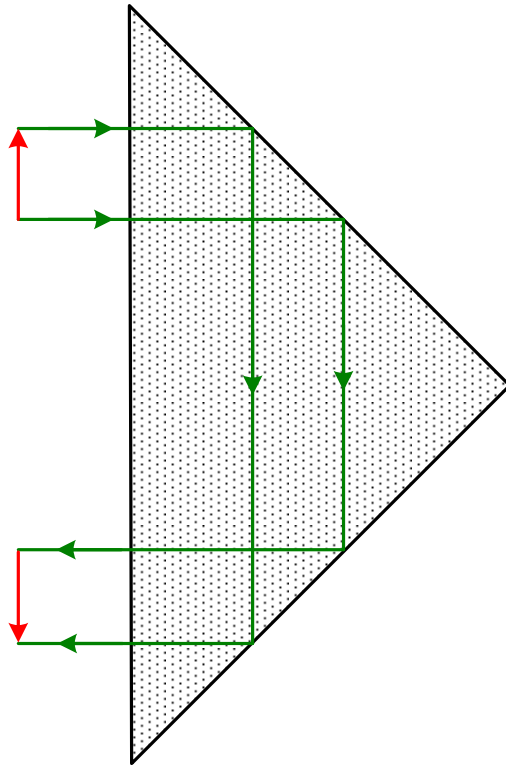


Кутикова призма

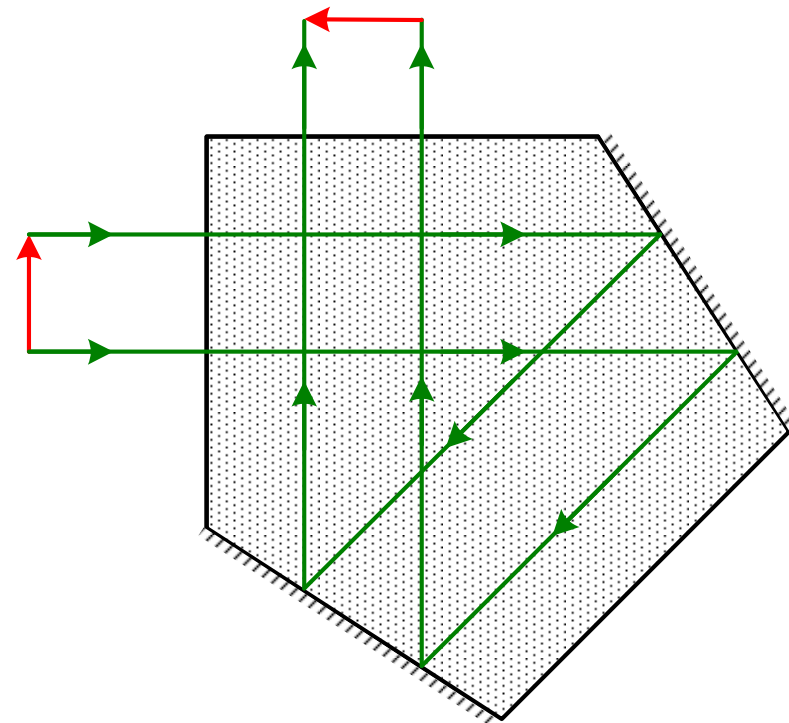
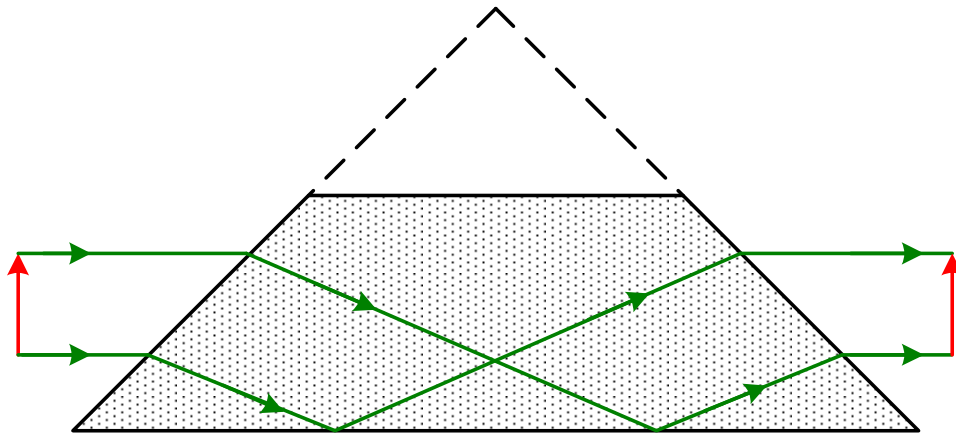
Це призма з трьома взаємно перпендикулярними відбиваючими поверхнями. Її характерна властивість: звідки б не прийшов світловий промінь, він відіб'ється у тому ж напрямі. Цю призму часто ще називають “кутиковий відбивач”, і її часто використовують як дзеркало для лазерного інтерференційного вимірювання довжини хвилі.



Приклади призм



Приклади призм



Призми

На практиці використовують і інші види призм, а також складі призмові конструкції.

Відбиття від граней призми відбувається зазвичай за рахунок повного внутрішнього відбиття, але якщо умова повного внутрішнього відбиття не виконується (у даному випадку $\sin \varphi > 1/n$), то грані призми сріблять (штриховка на останньому з прикладів призм).

При ході променів в одній площині призми з парною кількістю відбиваючих граней отримують пряме, а з непарною – обернене зображення.

Розщиплювачі та суматори променів

Розщиплювачі та суматори променів

Призначенням розщиплювачів є поділ вхідного світлового потоку на дві і більше частин.

Розщиплюють вхідний світловий потік:

- за енергією;
- за спектром;
- за просторовим напрямом;
- за поляризацією.

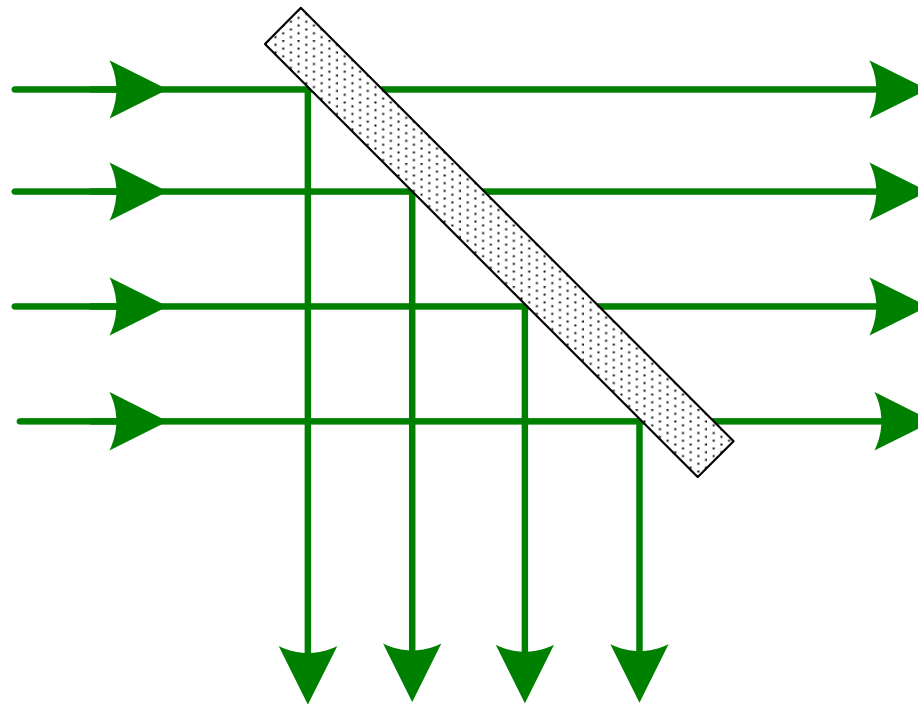
Типовою елементною базою таких пристроїв є:

- напівпрозоре дзеркало;
- прямокутні призми;
- непрозорі дзеркала;
- стрижньові лінзи;
- дифракційні ґратки.

Наприклад, іноді виникає необхідність передачі декількох світлових хвиль одним волокном. При цьому для введення двох оптичних хвиль в одне волокно використовують суматор, а для розділення – розщиплювач. Зазвичай це один і той самий пристрій.

Розщиплювачі та суматори променів

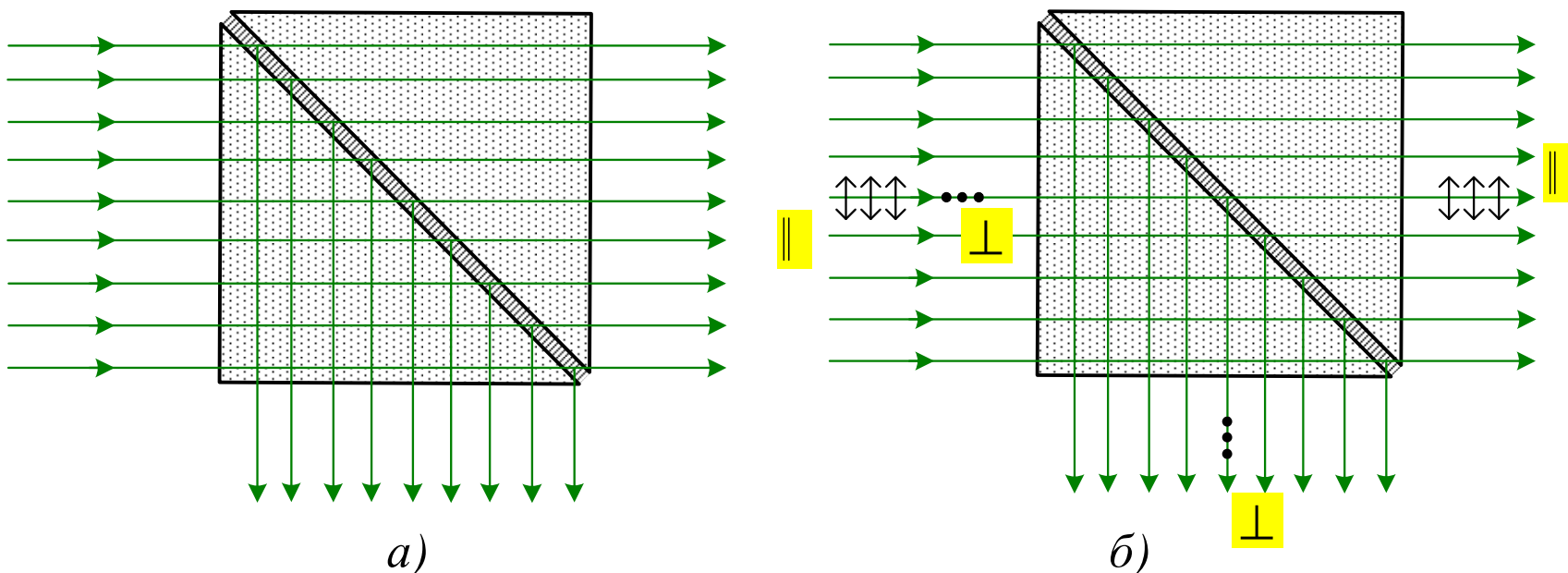
Вихідні світлові потоки мають приблизно однаковий спектральний склад, а співвідношення енергій потоків визначає прозорість дзеркала. При використанні спектрально-селективних дзеркал отримаємо розщиплювач світлових за спектром.



Розщиплювач світлового потоку на напівпрозорому дзеркалі

Розщиплювачі та суматори променів

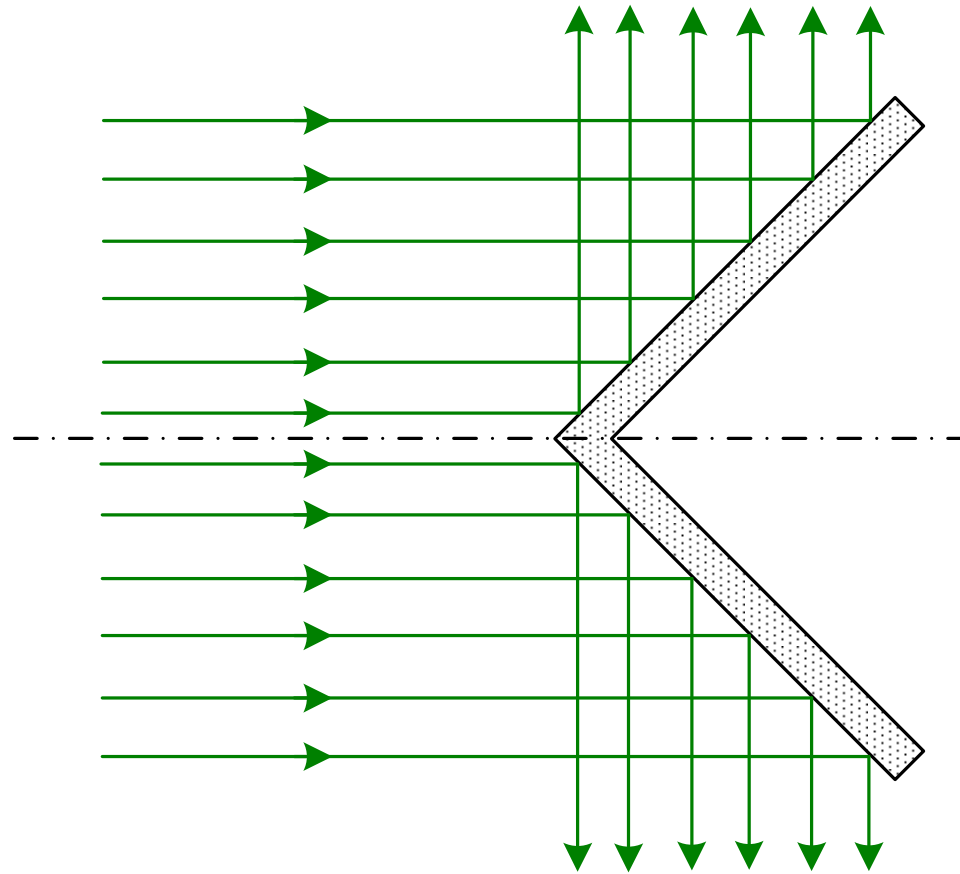
Використовують дві прямокутні призми та напівпрозору плівку. Останні зазвичай багат шарові. Шляхом оптимального вибору товщини плівок, їхньої кількості та коефіцієнтів передачі досягають різного співвідношення потужності вихідних світлових потоків, наприклад, 1:1; 1:10 тощо. Якщо ж надати цим плівкам поляризаційних властивостей, то отримаємо розщиплювач поляризованого світлового потоку, який розділяє вхідний світловий потік за потужністю залежно від його поляризації.



Розщиплювач світлового потоку на прямокутних призмах: а – з напівпрозорою плівкою; б – з поляризаційною плівкою

Розщиплювачі та суматори променів

Такий розщиплювач створює просторово та енергетично розщеплені вихідні світлові потоки. Напрямок поширення світлових потоків залежить від кута між дзеркалами, а їхні енергії – від площ цих дзеркал.



Розщиплювач світлового потоку на непрозорих дзеркалах

Розщіплювачі та суматори променів

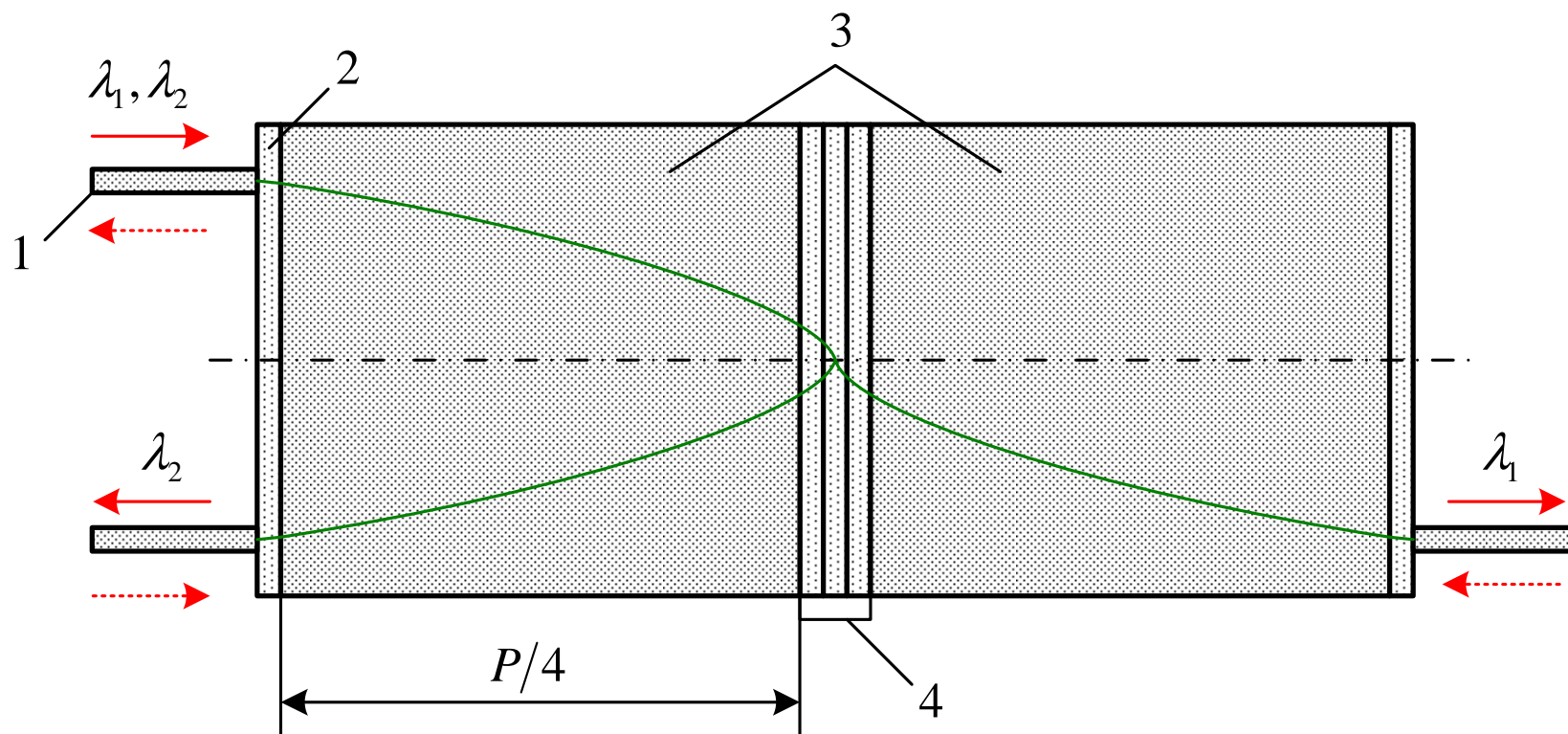
Оборотність світлових променів дозволяє використовувати ці розщіплювачі в якості суматорів світлових променів.

Підсумовування може бути:

- енергетичним;
- просторовим;
- спектральним.

Розщиплювачі та суматори променів

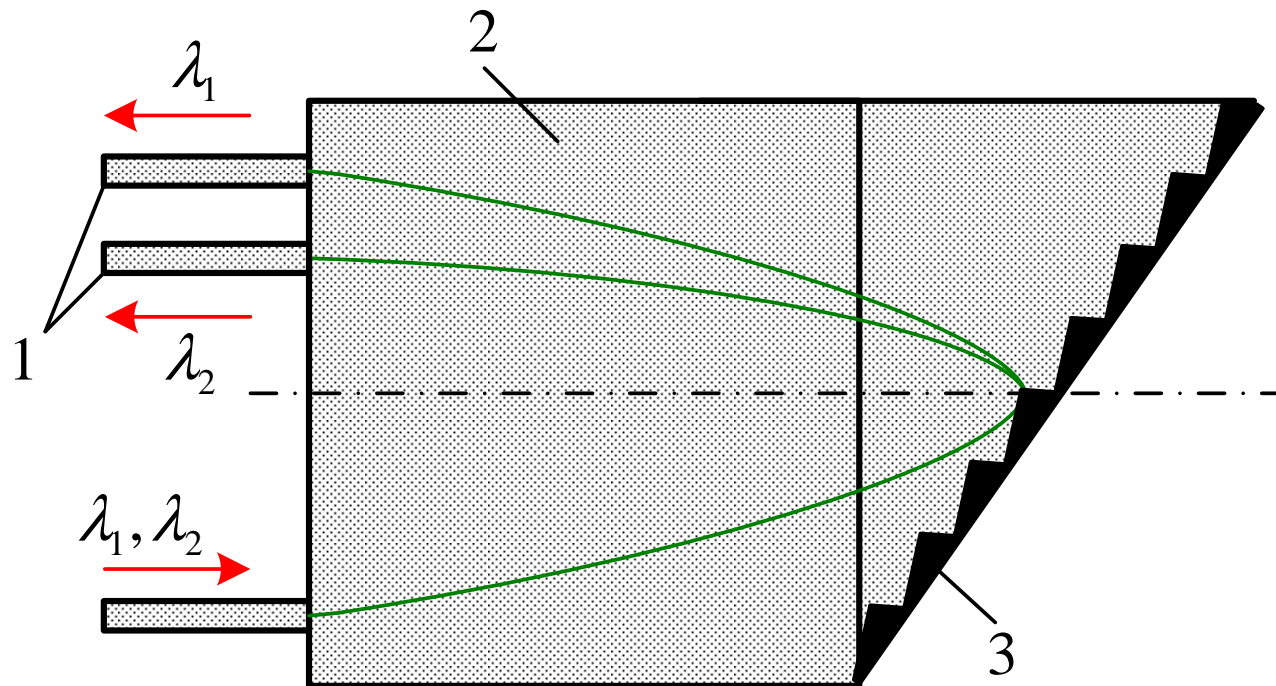
Оптичні осі лінз і волокон зміщені одна відносно одної. Типові характеристики таких пристроїв: кількість хвиль 2 – 6, пряме затухання 2...5 дБ, перехідне затухання 20...40 дБ, інтервал між довжинами хвиль 30...100 нм.



Розщиплювач (суматор) світлового потоку на стрижньових лінзах та багат шарових діелектриків: 1 – волокно; 2 – напівпрозора пластина; 3 – стрижньова лінза; 4 – багат шаровий діелектрик.

Розщиплювачі та суматори променів

У розщиплювачі (суматорі) світлового потоку на дифракційних ґратках використовують залежність кута дифракції променя від довжини хвилі. Оптичні волокна розміщують при цьому у місцях утворення світлової плями (дифракційного максимуму), що відповідають різній довжині хвилі.



Розщиплювач (суматор) світлового потоку на дифракційних ґратках:

1 – волокно; 2 – стрижньова лінза; 3 – дифракційні ґратки.

Розщіплювачі та суматори променів

Поляризаційна призма: розрізаючи кристал із двозаломленням (наприклад, кристал вапняного шпату чи кварцу) під певним кутом до його оптичної осі, можна отримати різні розщіплювачі поляризованого світла. Наприклад:

- ***призма-поляризатор Глана-Томсона:*** з променя з випадковою поляризацією виділяє промінь з лінійною поляризацією;
- ***призма-поляризатор Рошона:*** вхідний промінь світла з випадковою поляризацією розділяється на два промені з лінійною взаємно ортогональною поляризацією.

Ізолятори

Ізолятори

Оптичні ізолятори потрібні, наприклад, у схемах, де як джерело випромінювання використовують напівпровідниковий лазер з лінійно поляризованим світлом. Тут ізолятор потрібен для обмеження спектра та зменшення флуктуації випромінювання, зумовлених зворотним світлом.

Фазова пластина: використовує поперечне поширення світлової хвилі для отримання заданого значення фазового набігу між звичайним та незвичайним променем, а саме:

- **чвертьхвильова пластина** (набіг різниці фаз $\pi/2$): падаюче на таку пластину світло під кутом 45 градусів щодо двох оптичних осей кристала трансформується:

на вході лінійно поляризоване світло \rightarrow на виході світло правосторонньої колової поляризації;

на вході світло колової поляризації \rightarrow на виході світло з лінійною поляризацією;

Ізолятори

- *півхвильова пластина* (набіг різниці фаз π):

на вході лінійно поляризоване світло \rightarrow на виході лінійно поляризоване світло, але його площину поляризації повернуто на 90 градусів за годинниковою стрілкою;

на вході світло з правосторонньою коловою поляризацією \rightarrow на виході світло з лівосторонньою коловою поляризацією і навпаки.

Поляризаційна пластина і пластина-аналізатор: тут використовують анізотропію макромолекул, яка виникає внаслідок розтягування високомолекулярної плівки у певному напрямку, але при цьому ослаблення світла становить приблизно 100:1.

Типові ізолятори:

- а) поляризатор + чвертьхвильова пластина з оптичними осями, повернутими на 45 градусів відносно осей поляризатора (невелика розв'язка як недолік);
- б) ізолятор на ефекті Фарадея (розв'язка 50 дБ і більше!).