

Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 3 (лекції 6-8)
електронний дидактичний демонстраційний матеріал
супроводження дисципліни

ММІ, каф. ЛТФТТ, IVкурс VII семестр
(36 годин лекційний курс, 36 годин лабораторних занять, 180 години із
СРС)
5 кредитів

**Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» про (протокол
№7 від 27 березня 2014 р.) (свідоцтво НМУ № Е13/14-061)**

Автор: проф. Котляров В.П.

Лекція 6. Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

Для формування порожнин з простою формою попереку (коло, кільце. лінія) за невисокими вимогами до її якості, особливо з найменшим розміром попереку ($d \ll 0,3$ мм) та достатньо великою глибиною $h/d \gg 1$ мм застосовують технологічну схему операції за **рис.4.1б** (сл. 14, През.№2) без відносного переміщення променя 1 та заготовки 5 ($V = 0$). Обробку за цією технологічною схемою виконують з розташуванням поверхні заготовки в перетині каустики з найменшим розміром пучка лазерного випромінювання і називають обробкою «в далекій зоні», оскільки розподіл інтенсивності в цій площині відповідає розподілу в пучку на великій відстані від випромінювача: для TEM_{00} – Гаусове, для TEM_{mn} – Ейрі (дифракція хвилі з плоским хвильовим фронтом на отворі). Обидва розподіли характеризуються відсутністю чітких меж пучка, і розміри w_z і w_f (рис. 4.2) визначаються за різними ознаками:

- за падінню інтенсивності до рівня $I_{pz} = I_{p0}/e^2$ (I_{p0} - інтенсивність на осі пучка);
- за нормованим збільшенням діаметра перетину по відношенню до розміру горловини (рівняння (4.12) сл. 22, През.№2);
- по діаметру першого мінімуму розподілу Ейрі для TEM_{mn} (рівняння (4.15) Презентації 3).

Особливістю повздовжньої форми цієї ділянки каустики є відносна стабільність розміру її попереку (рівняння (4.13) та (4.17) сл. 23, През.№2), що забезпечує можливість підтримання достатнього рівня інтенсивності в зоні опромінення, тобто обробку глибоких порожнин. 2

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

Позитивні якості від використання цієї ділянки каустики в операціях обробки порожнин поєднуються із суттєвими недоліками:

- залежність якості форми попереку від властивостей активного середовища (однорідності його коефіцієнту підсилення), оптичних та геометричних властивостей елементів резонатору та перетворюючих оптичних засобів (лінз, об'єктиву або дзеркал);
- форма попереку каустики також визначається старанністю юстирування елементів випромінювача та центруванням оптичних систем (транспортувальної та перетворюючої).

Ці обставини ускладнюють процедуру проектування операції, роблять її результатами залежними від стану випромінювача, режиму його роботи, і внаслідок цього обмежують застосовність цієї технологічної схеми невідповідальними операціями з відносно простою формою поперечного

В цих прикладах поперечна форма порожнин подібна формі перетину пучка випромінювання на поверхні заготовки, що досягається застосуванням різних засобів 2 перетворення пучка випромінювання 1 в інструмент 3: сферична (а) для обробки круглого отвору діаметром $< 0,3$ мм; циліндрична (б) – для риски, щілини, пазу; спеціальна лінза (в) або система із аксікона 5 і сферичної лінзи 2 (г) – для отвору $> 0,3$ мм, або кільцевого пазу. Поверхня заготовки розташовується на відстані d_f від головної площини лінзи 2 (4.11), 4.12 сл.21, 22, През.№2).

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів
4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

Обробка в "дальній" зоні:

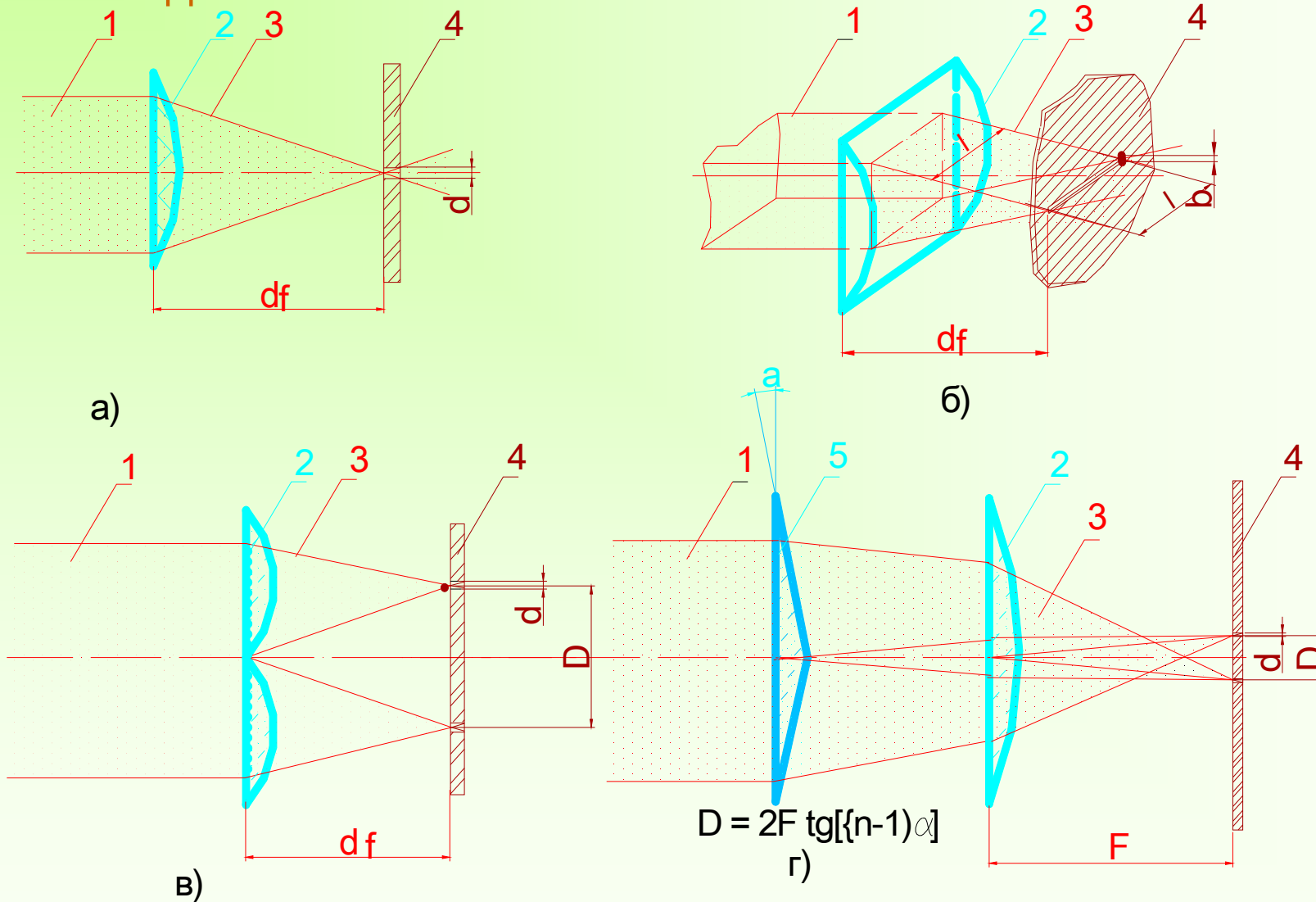


Рис.4.3. Оптичні схеми обробки порожнин при розташуванні заготовки у "дальній зоні" - у перетяжці каустики

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

- а) Отвори круглої форми обробляються:
- малих розмірів ($\leq 0,3$ мм) – копіюванням розміру та профілю каустики пучка в сферичній (параболічній) лінзі при розташуванні заготовки в межах найбільш інтенсивної її ділянки (рис. 4.3а);
 - більших розмірів – шляхом трепанації заготовки по межі отвору без її відносного переміщення з інструментом – пучком випромінювання кільцевої форми (рис. 4.3в, г).
- б) Щілини не наскрізні (риски, пази) та наскрізні (різи) – копіюванням розмірів та форми каустики пучка в циліндричній лінзі (рис. 4.3б) при розташуванні заготовки в межах найбільш інтенсивної її ділянки.
- Особливості технологічної схеми та результатів обробки в “дальній зоні” пов’язані з обмеженням в їх застосовності за формою попереку внаслідок її прямої залежності від форми інструменту, що відбивається на складності оптичного перетворюючого елемента (лінзи, дзеркала, тощо). Це ілюструє схема на рис. 4.3в, в якій для формування каустики кільцевої форми пропонується лінза у вигляді половини тору з його внутрішнім діаметром $d_{вн} = 0$, яку, по-перше, майже неможливо виготовити, а, вдруге, - для виготовлення отвору іншого розміру потрібна відповідна йому лінза із середнім діаметром тору рівним діаметру отвору. Останній недолік є причиною появи схеми обробки за рис. 4.3г, де використано об’єktiv із аксікона 5 та сферичної лінзи 2 і розміром отвору можна керувати зміненням лінзи 2:
- $$F = 2Ftg[(n-1) \alpha].$$

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів.

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

Остання оптична схема дороблена для створення можливості оперативним шляхом без додаткових процедур налагодження оптичної системи при зміні розміру отвору в широкому діапазоні, зокрема, центрування зміненої лінзи 2, а також відносного положення об'єктиву та поверхні заготовки 4. Це досягнуто ускладненням оптичної системи рис. 4.3г шляхом включення в її склад додаткового афокального телескопу 2 і 4 та розташованого в ньому аксікона 3 з можливістю його переміщення від лінзи 4 в сторону лінзи 3 в межах $d_{2min} \div d_{2max}$ (рис. 4.4) [2д].

Лазер 1 генерує цільний циліндричний пучок, який, проходячи через від'ємну лінзу 2, перший аксікон 3 і позитивну лінзу 4, перетворюється в кільцевий пучок внаслідок заломлення на конічній поверхні аксікона 3. Далі цей пучок направляється на другий аксікон 5, у якого кут біля основи α_5 обрано таким чином, щоб після заломлення на ньому пучок поширювався паралельно оптичній осі системи за кутом падіння променя на аксікон 5, який відповідає максимальній відстані d_{2max} між лінзою 4 телескопу та аксіконом 3. Це досягається за таких умов:

- кути біля основ аксіконів 3 і 5 співвідносяться, як:

$$\theta_5 = \theta_3(1 - d_{2max}\Phi_4) \quad (4.18)$$

- відстань розташування аксікона 5 відносно лінзи 4 / повинна перевищувати відстань до перетяжки лінзи 4:

$$l \geq \frac{r|\Gamma_m| - \theta_3(n-1)d_{2max}}{\text{tg}[\theta_3(n-1)(1 - d_{2max}\Phi_4)]} \quad (4.19)$$

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

Плавне змінення діаметрів кільцевих контурів (отворів) виконується внаслідок переміщення аксікона 3 вздовж осі оптичної системи відносно лінзи 4 і пояснюється рис. 4.4а и 4.4б. При цьому діаметр кільця в фокальній площині об'єктиву визначається за рівнянням:

$$D \approx 2f_{об} \theta_3 (n - 1)(1 - d_2 \Phi_8)$$

де: $f_{об}$ – фокусна відстань об'єктиву; Φ_8 – його оптична сила ($\Phi_8 = 1/f_{об}$).

Величина d_2 змінюється в межах: $d_{2min} < d_2 < d_{2max}$.

Величини d_{2min} і d_{2max} залежать від конструкції телескопу 2, 4. При цьому довжина робочого відрізка d_5 визначається фокусною відстанню об'єктиву 8, яка може бути встановлено максимальною і не змінюватися при переміщенні аксікона 3. Завдячуючи телескопу (на схемі не показано) можна в процесі обробки змінювати діаметр кільця переміщенням аксікона 3, що підвищує продуктивність і якість обробки.

Проаналізуємо невиконання співвідношень (4.18), (4.19).

1. Кут θ_5 менше розрахункового значення за рівнянням (4.18). При $0 < \theta_5 < \theta_{5роз}$: не забезпечується отримання мінімального діаметру кільця за визначеною схемою.
2. Кут θ_5 більший розрахункового за рівнянням (4.18): не забезпечується отримання максимального діаметра кільця за визначеною схемою.
3. Аксікон 5 встановлений на відстані l , яке не задовольняє умові (4.19). На разі неможливо у фокальній площині об'єктиву 8 отримати кільце.

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів.
4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з попереком простої форми

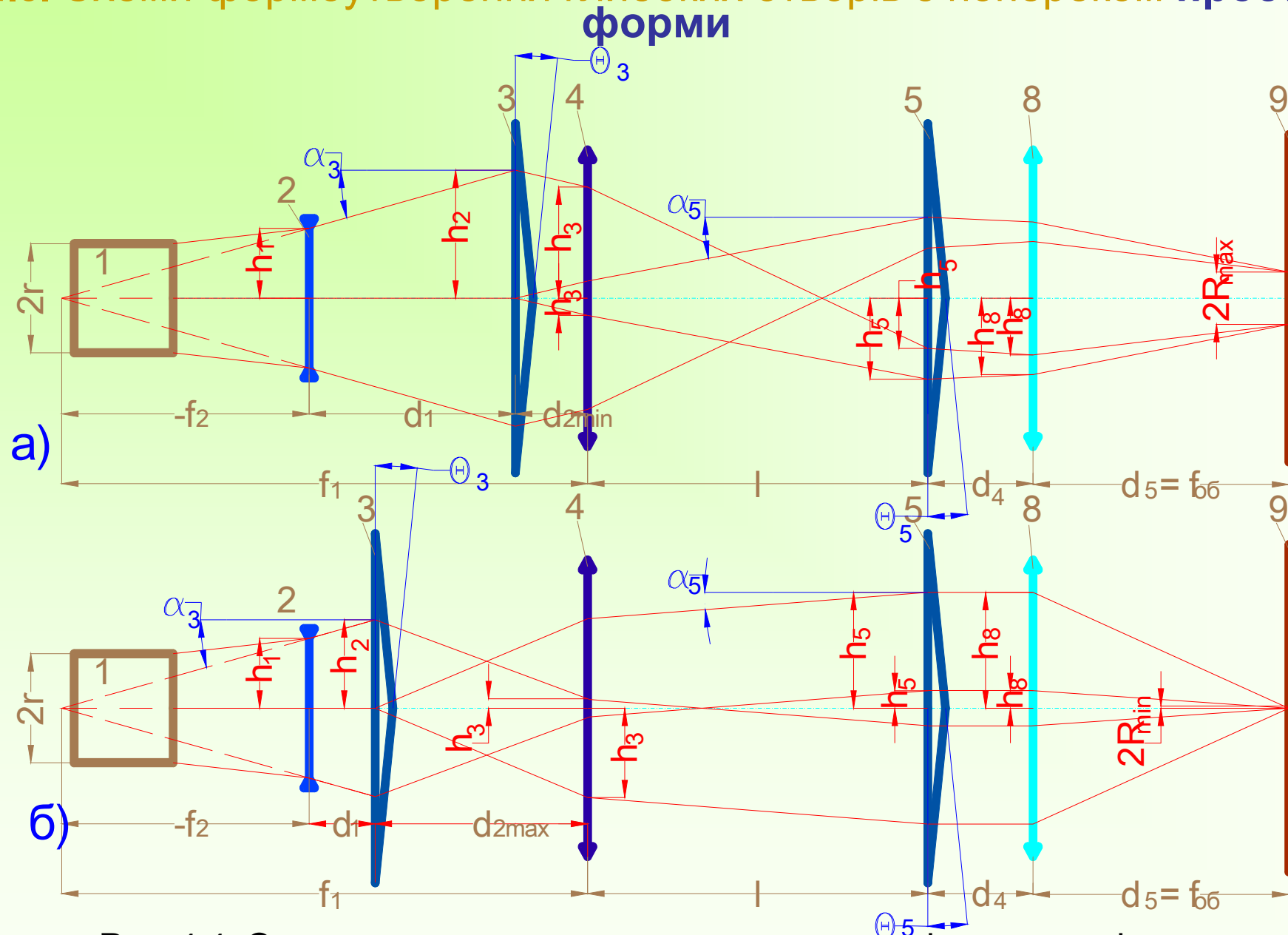


Рис. 4.4. Оптична схема пристрою для плавного змінення розміру отвору, який обробляється методом трепанації

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів
4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з поперечком простої форми

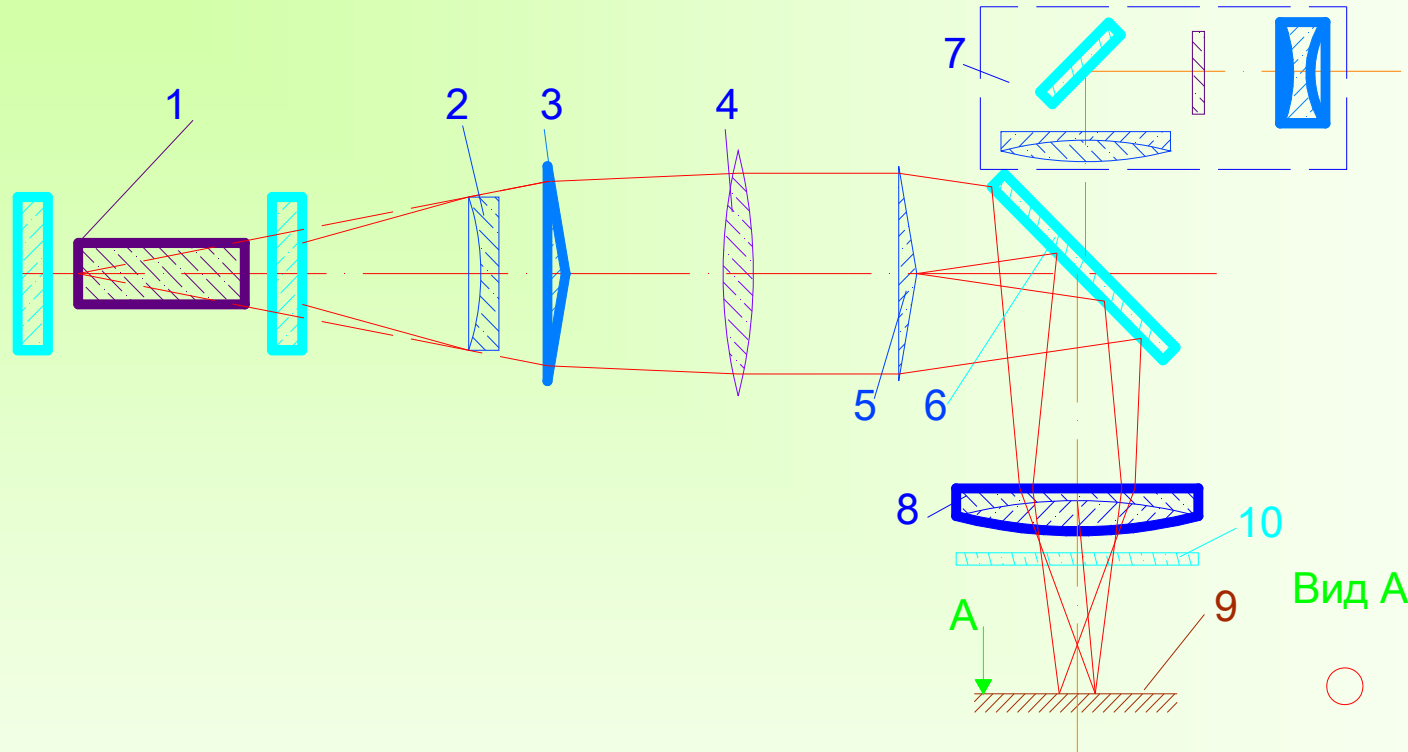


Рис. 4.5. Оптична схема для обробки отворів великого розміру методом трепанації

Приклад: Для телескопу Галілея ($\Gamma = -F_2/F_4 = -25/100 = -4$) з розрахунковими значеннями $d_2 = 5 \div 70$ мм та з конічною лінзою 3 при куті у основи $\theta_3 = 9^\circ$, конічна лінза 5 виконується з кутом у основи $\theta_5 = 2,7^\circ$ та розташовується на відстані $l = 200$ мм від останньої лінзи телескопу 4. Для об'єктива 8 з фокусною відстанню $F_8 = 100$ мм, діапазон керування діаметром кільцевих контурів дорівнює $2R = 0 \div 10,4$ мм. При нулі кільце перетворюється в крапку діаметром $d_0 \approx F_8 \theta$ (θ – кут розбіжності пучка випромінювання).

Лекція 7. Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

- а) Точні отвори малих розмірів ($\leq 0,3$ мм) правильної круглої форми обробляються копіюванням розміру та профілю перетину каустики пучка випромінювання після сферичної (параболічної) лінзи при розташуванні поверхні заготовки в її площині зображення маски (трафарету) із непрозорого матеріалу з отвором круглої форми, розташованій перед лінзою (рис. 4.1а, сл. 14, През.№2);
- б) Отвори із складним профілем перетину малого розміру обробляються копіюванням розмірів та профілю перетину каустики пучка після його перетворення в сферичній лінзі (рис. 4.1а) при розташуванні поверхні заготовки в площині різкого зображення отвору в масці (трафарету), яка розташована просторі предметів лінзи в межах найбільш інтенсивної її ділянки.
- в) Порожнина, довга в одному з напрямів (не круглі отвори, лунки, пази, різи, риски) обробляються шляхом мультиплікування одиничного зображення її елемента (а або б) копіюванням отвору маски (рис. 4.1в).

Зважаючи на метод формування профілю порожнини – з маски, розташованій перед лінзою та сполученість з нею її зображення та розподілу інтенсивності, ця схема має назву “обробка в ближній зоні” або проєкційний метод (рис. 4.6, 4.7).

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

А. Проекційні системи

а). Розрахунок параметрів проекційної системи

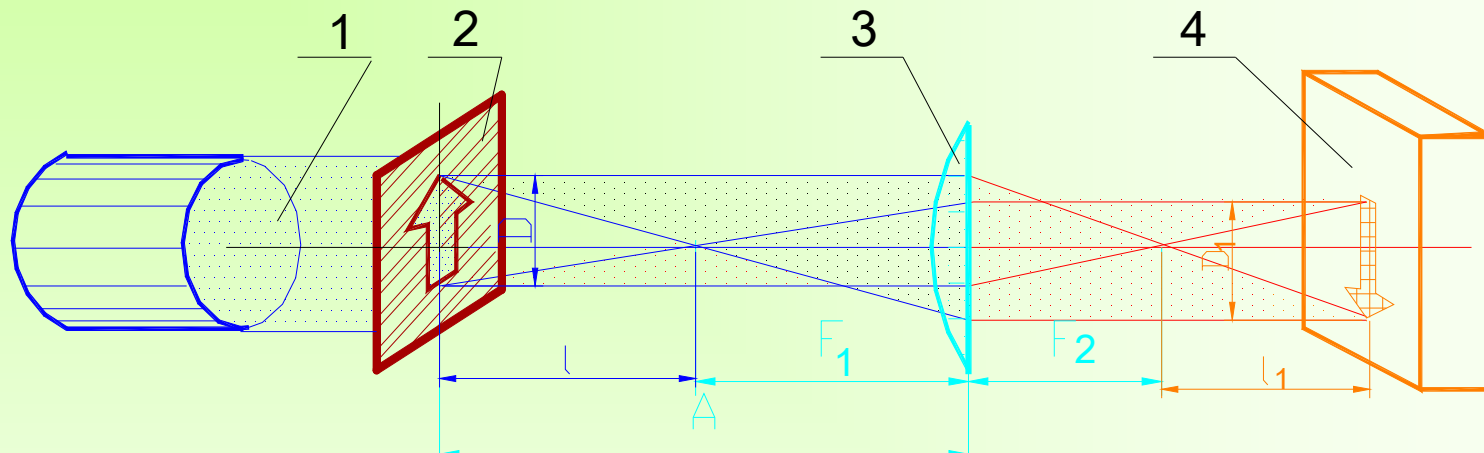


Рис.4.6. Оптична схема для проекційної обробки порожнин

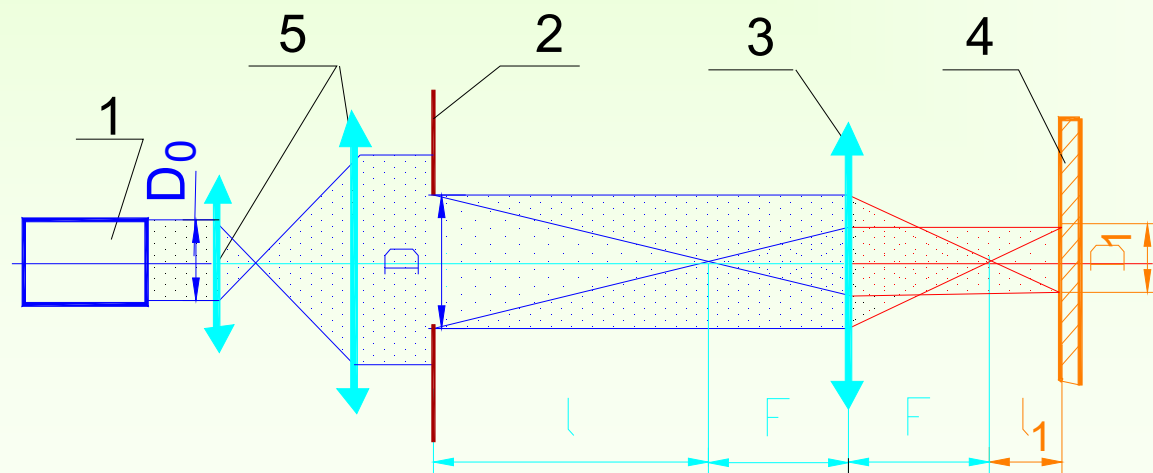


Рис.4.7. Реальна схема оптичної системи для проекційної обробки

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

А. Проекційні системи

а). Розрахунок параметрів проекційної системи

Розрахунок параметрів оптичної проекційної системи: основна [1], додаткова – [1]:
 На рис. 4.6 зображена оптична проекційна схема (1 – випромінювач; 2 – маска; 3 – об'єктив; 4 – заготовка), а на рис. 4.7 – її реальний варіант.

Визначенню підлягають:

- **оптичні параметри проекційної системи;**
- **габаритний розрахунок розташування її елементів.**
- **мінімальне збільшення об'єктиву 4 (максимальне зменшення) визначається променевою стійкістю матеріалу маски та заготовки для обраного виду руйнування її матеріалу:**

$$\beta_{min} \geq \frac{W_p^{заг}}{W_p^{мас}} \quad [4.20]$$

- **максимальне збільшення об'єктиву 4 (мінімальне зменшення), яке повинне забезпечити задану максимальну роздільну здатність елементів профілю порожнини d_{min} , що обмежується дифракцією пучка на апертурі об'єктиву:**

$$\beta_{max} \leq \frac{\lambda F}{(D_{об} - D)d_{min}} \quad [4.21]$$

- **розмір профілю порожнини в масці 3 при вибраному збільшенні об'єктиву $\beta \geq |\beta_{наиб}|$ (β_{min} або β_{max}):**

$$D = D_1 \beta \quad [4.22]$$

- **енергетичний режим роботи лазера – інтенсивність в пучку випромінювання:**

$$I_p = W_p^{лаз} / A \geq W_3^{маск} \times \beta_m^2 = \frac{W_p^{заг} \beta_m^2}{A \beta^2} \quad [4.23]$$

- **габаритний розрахунок: $I_1 / F_1 = F / l = D_1 / D = 1 / \beta$**

$$[4.24]$$

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів
4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю
А. Проекційні системи

Недоліки проекційної схеми обробки:

- зниження частки енергії випромінювання, яка корисно використовується, при ускладненні малюнка маски;
- необхідність у великій довжині оптичного тракту і у високій точності відносного позиціювання маски і заготовки;
- необхідність в коротко фокусному об'єктиві за умовами (4.21) і (4.22);
- - невисока глибина різкості у площині проєкції, що обмежує застосовність методу поверхневою обробкою (термічною, гравіруванням, підгонкою плівкових резисторів; формуванням структур інтегральних схем та ін.).

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

А. Проекційні системи

б). Контурно-проекційна обробка

Використовується найчастіше для реалізації схеми рис. 4.1в, тобто для формування довгих порожнин шляхом мультиплікування.

За цієї схеми досягаються такі переваги:

- знижується вимога до точності осевого позиціонування елементів проекційної схеми внаслідок розташування маски та передньої фокальної площини об'єктиву у фокальній площині лінзи 2, яка що значну глибину фокусу ;
- підвищується ефективність використання енергії променя внаслідок скорочення різниці між площею променя та отвору в масці при їх зменшенні:

$$\eta = \frac{S_{отв}}{S_{пв}} = \frac{4d_{кв}^2}{2\pi d_0^2} = \frac{2}{\pi},$$

- **Приклад застосування схеми:** Виготовлення доріжок в резистивній плівці шириною 5 мкм та довжиною до 10 мм. Розмір вікна в масці 50×50 мкм, лінза 2 має фокусну відстань $F_2 = 160$ мм, об'єктив $F_4 = 15,7$ мм, крок $S = 2,5$ мкм.

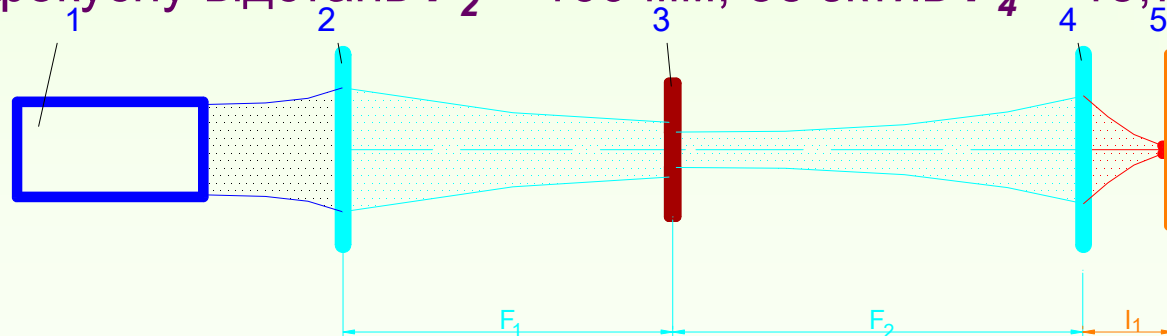


Рис.4.8. Оптична система для контурно-проекційної схеми обробки порожнин

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

А. Проекційні системи

в). Спосіб активного формування профілю пучка лазерного випромінювання [1д], за яким в активному середовищі лазера посилюється лише пучок, поперек якого формується малюнком маски, використовують для подальшого зменшення витрати частини енергії випромінювання на масці. При такому формуванні пучка лазерного випромінювання тіло маски виключається від його дії і пошкодження, тому можливе вживання «динамічних масок», малюнок яких можна міняти під час виконання технологічної операції. На рис. 4.9 зображена одна з можливих оптичних схем активної проекційної системи, особливістю якої є розташування маски 3 і проекційної системи (об'єктиву 5) всередині резонатора. Останній утворено 100% сферичним дзеркалом 2, з поверхнею якого поєднана площина маски 3, і поверхнею оброблюваної заготовки з коефіцієнтом віддзеркалення $R = 100 - A$ (A – коефіцієнт поглинання поверхні заготовки). Для поверхні заготовки з близьким до 100% поглинанням встановлюється напівпрозоре дзеркало 7 між заготовкою і об'єктивом. Оскільки активне середовище 1 лазера підсилює лише частиною свого об'єму, обмеженого ходом пучка через маску, то для достатньої потужності випромінювання її коефіцієнт посилення α має бути високим, наприклад, для пари міді з $\alpha = 10^2 \text{ см}^{-1}$.

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

А. Проекційні системи

За умови забезпечення рівномірності опромінення заготовки в площині зображення маски встановлюються деякі закономірності розташування елементів схеми:

- вихідну зіницю об'єктиву поєднують з його фокальною площиною (встановлюють діаграму 4 з діаметром $D_0 < D_{ac}$);
- діаметр поля зору менший ніж діаметр активного середовища D_{ac} ;
- центр кривизни дзеркала 2 поєднується з центром вихідної зіниці ($R = a + nl + b$) (n – показник переломлення матриці активного середовища).

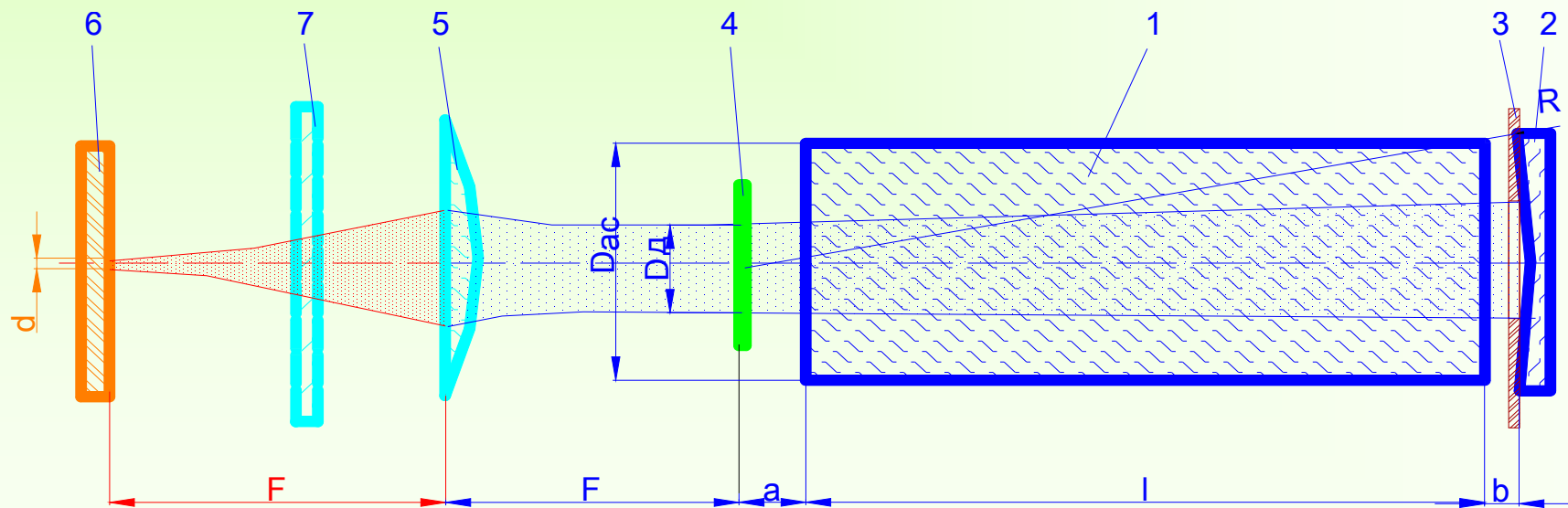


Рис.4.9. Оптична схема для проекційної схеми обробки порожнин з активним формуванням профілю пучка

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

Б. Профілювання пучка випромінювання оптичним елементом

Окрім проекційних схем обробки з копіюванням малюнка маски на заготівці застосовуються інший метод формування пучків випромінювання з необхідною формою поперечного перетину: **плоским фокусуючим оптичним елементом – фокусатором.**

У такій оптичній системі суцільний пучок випромінювання перетворюється в **прямокутний або кільцевої форми, в довільну криву із заданим розподілом інтенсивності, в набір відрізків, крапок і символів елементом спеціальної конструкції.** Його проектування виконується методами комп'ютерної оптики і полягає в рішенні зворотної задачі – проектування мікроструктури дзеркальної поверхні, оптично зв'язаної з потрібним профілем порожнини. Для виготовлення фокусатора використовується складна технологія, яка включає в себе механічну нарізку дзеркальних елементів на м'яких (податливих) матеріалах тому потрібна наступна операція для покриття нарізаної поверхні міддю шляхом її електрохімічного осадження. Одержана хитка конструкція укріпляється збільшенням товщини фокусатора з наступним оздобленням дзеркальних поверхонь. Хоча ефективність використання енергії випромінювання при їх застосуванні досягає 80-90%, ні раніше, ні в даний час вони не знайшли якого-небудь вживання із-за складнощів розрахунку профілю і їх тиражування. До того ж висота дзеркальних елементів повинна не перевищувати 0,5 довжини хвилі випромінювання, що технологічно обмежує можливе використання фокусаторів лише для випромінювання CO₂ –лазерів.

Лекція 8. Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

В. Обробка порожнин методом трепанації (вирізки)

Збільшення поперечних розмірів порожнин ускладнює використання першої та третьої технологічних схем обробки (рис. 4.1а та 4.1.в) внаслідок потреби застосування потужних лазерів для забезпечення необхідного рівня інтенсивності в межах одиничної зони опромінення. Для розширення розмірних можливостей лазерної обробки порожнин складної поперечної форми застосовують другу технологічну схему обробки (рис. 4.1.б) за рахунок відносного переміщення сфокусованого пучка лазерного випромінювання або заготівки вздовж контуру порожнини (метод трепанації). У найбільш *простих пристроях*, які використовуються для формування порожнини круглої форми, лінзу 2 зміщують з осі пучка 1 на відстань l і обертають навколо останньої із кутовою швидкістю ω , яку визначають в складі параметрів режиму обробки (рис. 4.10а). Як при використанні цієї схеми, так і для схеми б), де промінь 1 перед лінзою 2 нахилється на кут φ за допомогою оптичного клину 5 із матеріалу з оптичною щільністю n і з кутом у основи α , який може обертатися довкола осі променя 1 із швидкістю ω і сканувати промінь вздовж контуру отвору на поверхні заготовки 4, максимальний поперечний розмір порожнини обмежено апертурою лінзи.

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів
4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю
В. Обробка порожнин методом трепанації (вирізки)

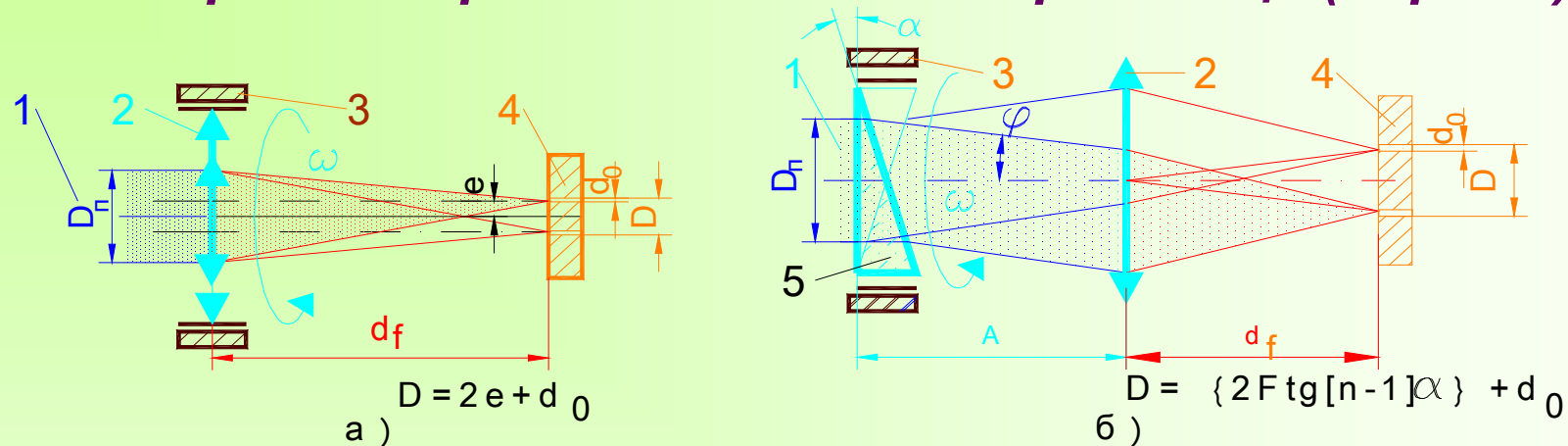


Рис.4.10. Технологічні схеми обробки круглих порожнин шляхом трепанації

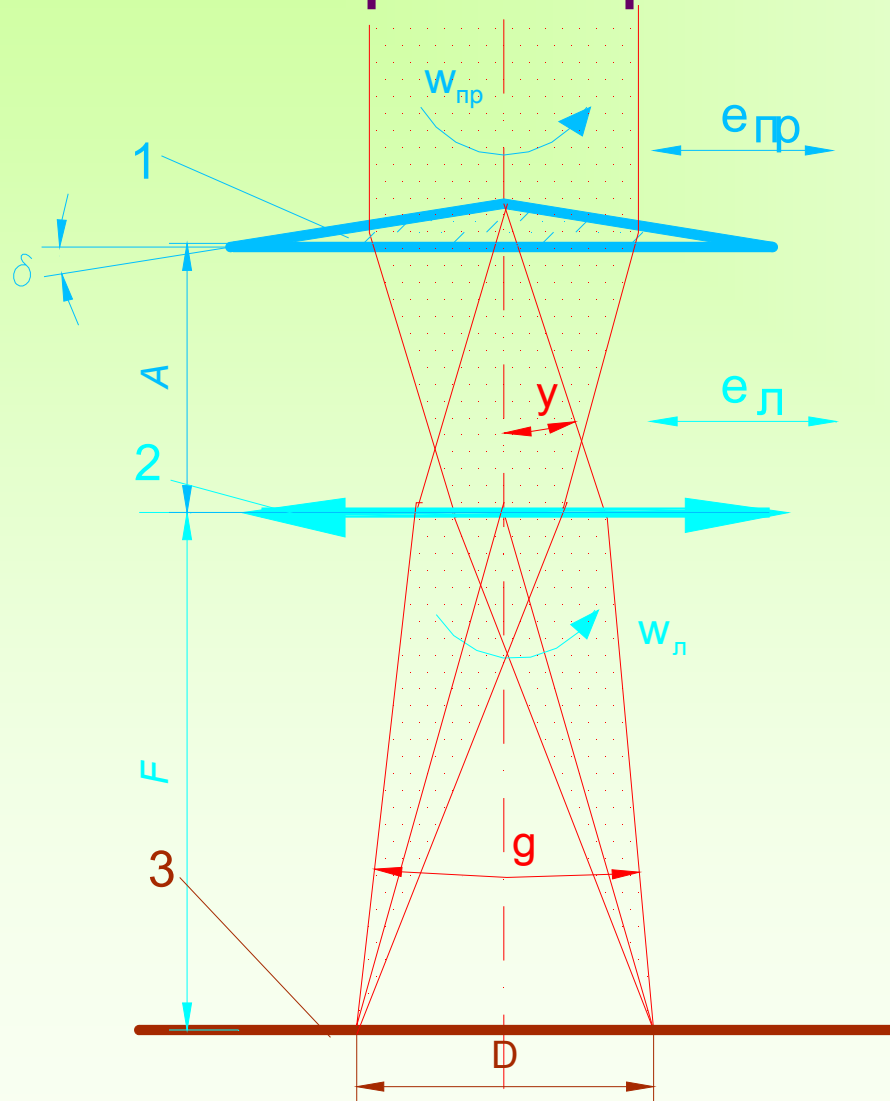
Схема сканера з біпризмою показана на рис.4. 11. У його склад входить фокусувальна лінза 2, встановлена з можливістю радіального зсуву з осі пучка випромінювання ($e_{л}$) і обертання відносно останньої; біпризма 1, що розташовується над фокусувальною лінзою і має ті ж міри свободи ($e_{пр}$), а також можливість переміщення уздовж осі пучка (відстань A). Розташування перед фокусувальною лінзою 2 біпризми 1 з вершиною на осі пучка дозволяє розділити останній на два, які прямують на лінзу під кутом ψ до осі: $\psi = \delta(n-1)$, де:

При обертанні призми 1 відносно осі пучка, вони з тією ж швидкістю переміщуються уздовж лінії кола діаметром D один за одним по поверхні заготовки 3, утворюючи замкнуте коло через половину оберту біпризми. При цьому симетричне розташування біпризми відносно осі пучка забезпечує поділ його енергії на рівні частини, тобто опромінення кожною долею пучка виконується за однакових умов.

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

В. Обробка порожнин методом трепанації (вирізки)



При необхідності обробки порожнин складнішої форми відносне переміщення виконують вздовж координат (X та Y) або одним елементом (заготовкою або променем), або розділяючи переміщення між ними.

Рис. 4.11. Схема сканера з біпризмною

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.5. Методи управління повздожньою формою порожнини

На профіль порожнини визначальний вплив роблять форма і розміри каустики перетвореного оптичним елементом пучка лазерного випромінювання; товщина і властивості матеріалу заготовки, її положення в каустиці, а також рівень і градієнт інтенсивності випромінювання по глибині порожнини.

На рис. 4.12 показані подовжні профілі глухих порожнин, які оброблено при розташуванні поверхні заготовки в різних перетинах каустики лазерного випромінювання, перетвореного оптичним елементом, що відповідає різним умовам опромінення.

- **Конічна форма порожнини** відповідає далекому розташуванню поверхні заготовки від площини перетяжки каустики сфокусованого пучка, тобто там, де інтенсивність випромінювання недостатня для випару матеріалу значної товщини.
- У міру зміщення поверхні заготовки в найбільш щільну частину каустики глибина порожнини зростає, причому інтенсивніше з боку негативних зміщень (углиб заготовки), переходячи в **подібну краплі форму** поблизу площини перетяжки.
- При зменшенні негативного зміщення заготовки конічна порожнина трансформується в **циліндричну**, яка утворюється при розташуванні поверхні заготовки поблизу перетяжки каустики. Порожнина **найбільшої глибини** формується при декілька більшому зміщенні перетяжки углиб заготовки. Такому положенню заготовки відповідають також **найменші поперечні розміри порожнини**.

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів
4.5. Методи управління повздожньою формою порожнини

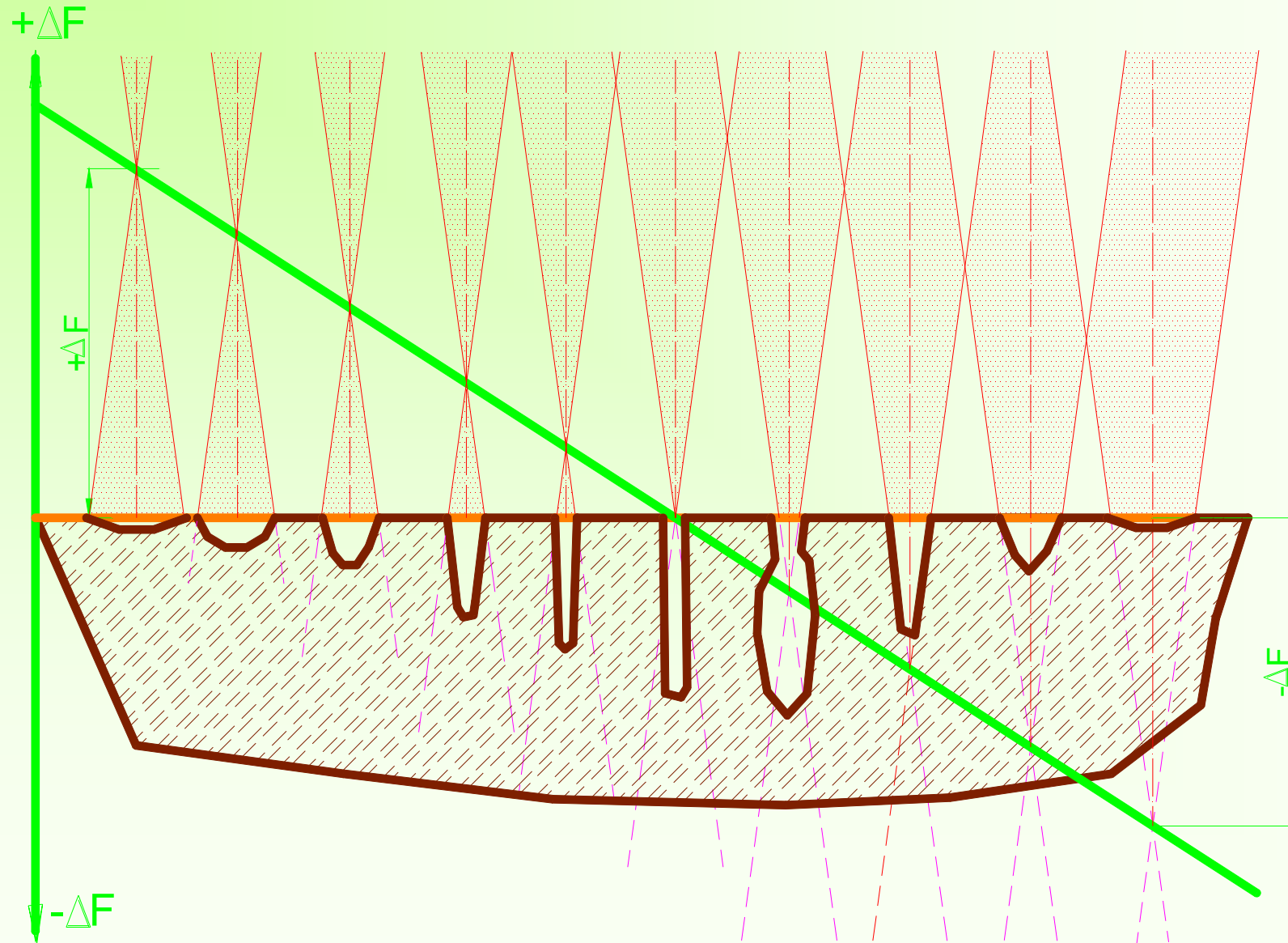


Рис.4.12. Вплив умов опромінення (ΔF) на подовжній профіль порожнини

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.5. Методи управління повздовжньою формою порожнини

Наскрізні порожнини змінюють свій профіль при зміні умов обробки, проте, вони менш різноманітні через відсутність одного з етапів - формування вершини порожнини мало інтенсивним пучком випромінювання. На рис. 4.13 показано вплив положення заготовки в каустиці пучка лазерного випромінювання на типові форми наскрізних порожнин. На підставі цих даних можна рекомендувати наступні умови опромінення для обробки порожнини потрібної форми:

- **циліндричний профіль (а, с)** можна отримати при розташуванні поверхні заготовки із зміщенням від площини перетяжки на величину $\Delta F = - (1 \div 1,5)\% F$, тобто перетяжку **необхідно заглиблювати** в тіло заготовки;
- **конічні порожнини (b, e)** з прямим конусом формуються при істотно **більших заглибленнях перетяжки** вглиб заготовки $\Delta F = - (3,5 \div 4)\% F$ або $\Delta F \gg 0$;
- **конічні порожнини із зворотним конусом** обробляються при **позитивному зміщенні** ($\Delta F > 0$), тобто перетяжка повинна знаходитися над поверхнею заготовки.

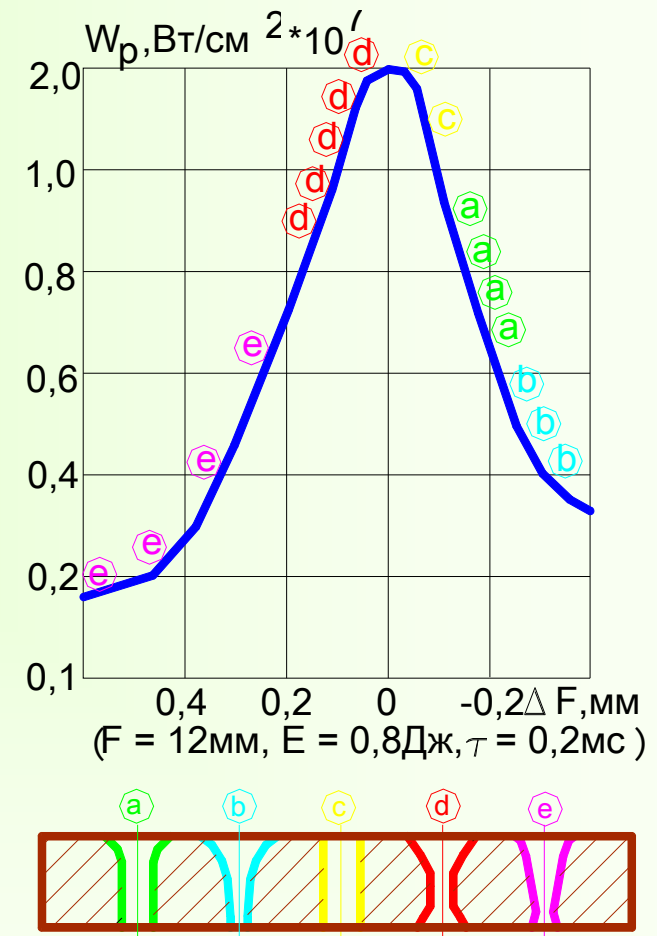


Рис. 4.13. Залежність профілю наскрізних порожнин від умов опромінення (ΔF)

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.5. Методи управління повздовжньою формою порожнини

Наведені вище дані та рекомендації стосуються обробки порожнини одним імпульсом випромінювання.

Для багато імпульсної схеми (БІО) формування подовжного профілю отвору змінюються деякі з наведених залежностей, зокрема, характер впливу на профіль **фокусної відстані об'єктиву**. В разі обробки одним імпульсом форма теплового джерела, створеного внаслідок опромінення, визначає розмір та профіль отвору. Для БІО отвір створюється опроміненням поверхні його каналу імпульсами із змінними параметрами (діаметром та рівнем інтенсивності), тому його повздовжній профіль визначається профілем каустики та розташуванням в ній заготовки. Перерви між імпульсами додають можливостей керування профілем отвору і для цього застосовуються різні технологічні прийоми. Один з них полягає в зміні умов обробки (включаючи умови опромінення) в перервах між імпульсами.

Результати досліджень показують можливість управління профілем порожнини шляхом різних закономірностей зміни комбінації імпульсної енергії E та умов опромінення (F і ΔF) в перервах між імпульсами. Наприклад, в разі таких умов опромінення: фокусна відстань лінзи $F = 20\text{мм}$, $\tau = 0,6\text{мс}$; $n = 5$ імпульсів з сумарною енергією $E_{\Sigma} = 25\text{Дж}$ при послідовному зміщенні заготовки на $\Delta F = 0,4\text{мм}$ перед черговим імпульсом випромінювання назустріч променю, можна отримати **порожнини ампульної форми** при **зменшенні енергії від імпульсу до імпульсу** з 9 до 1Дж (через 2Дж); **конічні** – підтримуючи **імпульсну енергію постійною по 5Дж** у кожному імпульсі, і близьку до **циліндричної** – при **збільшенні енергії** з 1 до 9Дж (через 2Дж).

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів
4.5. Методи управління повздожньою формою порожнини
Обробка циліндричних отворів

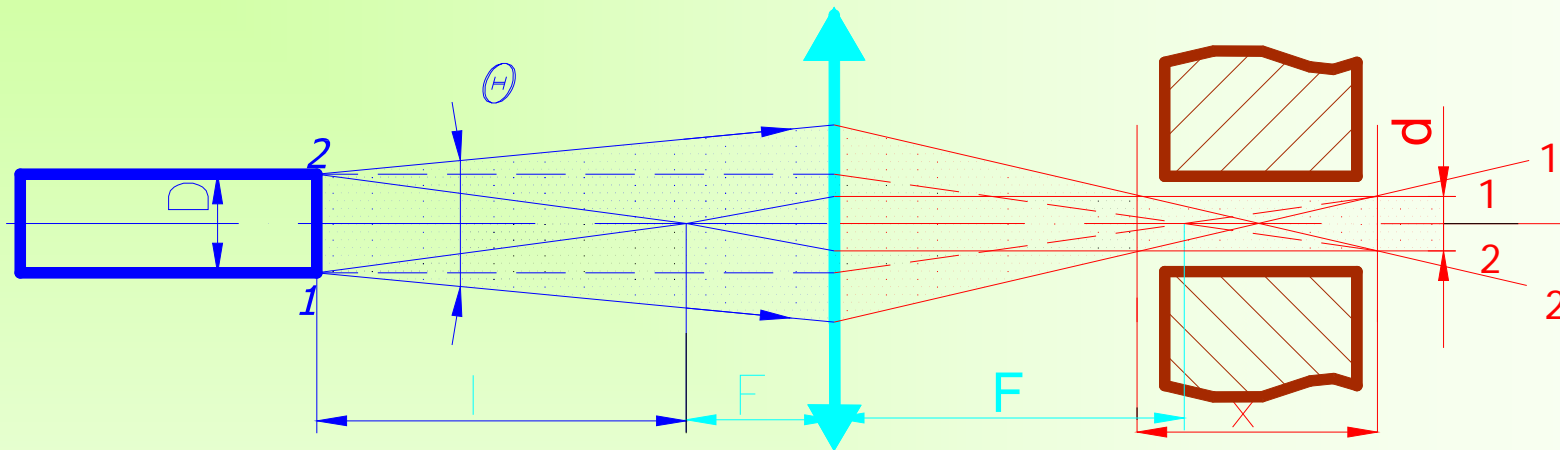


Рис.4.14. Оптична схема обробки в циліндричній світловій трубці

• відстань від випромінювача до передньої фокальної площини об'єктиву:

$$l = \frac{D}{\theta}$$

• діаметр отвору:

$$d = F \cdot \theta$$

• довжина циліндричної ділянки каустики:

$$X = \frac{d^2}{D \theta}$$

або:

$$X = \frac{F^2 \theta}{D}$$

Контрольні запитання та завдання

- 4.1. Яку інформацію повинна утримувати технологічна схема операції ЛРО?
- 4.2. Які чинники впливають на вибір схеми утворення порожнини з різними вимогами до її перетину?
- 4.3. Як формуються розміри порожнин, які оброблено за різними схемами формоутворення?
- 4.4. Які дві схеми опромінення використовують в технологічних схемах в залежності від вимог до якості порожнини, її поперечної форми та розмірів? Чому вони носять такі назви?
- 4.5. Чим характеризується пучок лазерного випромінювання, як інструмент, для кожної схеми формування перетину порожнини?
- 4.6. Які параметри випромінювача (активного середовища та резонатора) впливають на розміри та форму каустики в резонаторі?
- 4.7. Як впливає положення перетворюючого елемента (наприклад, лінзи) відносно випромінювача на форму та розміри каустики сфокусованого пучка випромінювання?
- 4.8. За якими ознаками можна визначати глибину фокусу каустики пучка випромінювання, перетвореного лінзою?
- 4.9. Як прийнято визначати розмір перетвореного лінзою пучка TEM_{00} при його вимірі?
- 4.10. Як прийнято визначати розмір перетвореного лінзою пучка TEM_{mn} при його вимірі (за досить високому порядку моди $m(n)$)?
- 4.11. Наведіть приклади обробки у дальній зоні порожнин різного виду перетину.

Контрольні запитання та завдання (подовження)

- 4.12. В яких випадках використовують проєкційну схему обробки порожнини (розмір, форма порожнини та вимоги до її якості)?
- 4.13. Накреслити в геометричному наближенні оптичну схему проєкційної системи для обробки порожнини складного перетину.
- 4.14. Порядок розрахунку оптичних властивостей (збільшення) складових проєкційної оптичної системи?
- 4.15. Виконати габаритний розрахунок оптичної системи для проєкційної обробки порожнини з перетином $0,2 \times 0,2$ мм в фользі із Cr ($W_p = 10^7$ Вт/см²) випромінюванням лазера YAG: Nd⁺³ ($\lambda = 1,06$ мкм) діаметром 6 мм за умови використання маски із кольорового акрилу ($W_p = 10^4$ Вт/см²).
- 4.16. Які недоліки супутні проєкційній схемі обробки?
- 4.17. Зменшення кількості недоліків проєкційної схеми обробки при використанні додаткової (до фокусуючої) довго фокусної лінзи для перетворення пучка випромінювання (контурно-проєкційний метод обробки).
- 4.18. Чим принципово відрізняється формування інструменту для активної та звичайної проєкційної схеми обробки?
- 4.19. Що дозволяє використовувати маски з можливістю оперативної зміни форми оброблювальної порожнини (рідко кристалічні конструкції, голограми) в активних проєкційних системах обробки порожнин?
- 4.20. Принцип створення плоских фокусаторів методами комп'ютерної оптики.

Контрольні запитання та завдання (подовження)

- 4.21. Наведіть приклади технологічних схем операцій обробки порожнини простого перетину збільшеного розміру методом трепанації.
- 4.22. Які за подовжнім профілем порожнини (крізні та не наскрізні) можна виготовити ЛРО?
- 4.23. Які за повздовжнім профілем порожнини можна виготовити за різних умов опромінення (F та ΔF)?
- 4.24. Який додатковий шлях формування повздовжнього профілю порожнини з'являється при використанні БІО? Навести приклад.
- 4.25. Оптична схема ЛТУ для обробки в циліндричній світловій трубці. Габаритний розрахунок.

Бібліографічний опис до Теми 4

Основна:

1. **Котляров В.П.** Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки). Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308с. стор. 30-50.
2. **Справочник по технологии лазерной обработки / В.С.Коваленко, В.П.Котляров, В.П.Дятел и др.** Киев.: Техніка, - 1985. с 167. стор. 75

Додаткова:

1. **Вейко В.П.** Лазерная микрообработка. - Санкт-Петербург: ГУ ИТМО, 2005. – 110с. стор 32-47, 40-44, 112-115
2. **Малащенко А. Т., Мышковец В. Н., Покаташкин Г. Л.,** Установка для лазерной обработки кольцевым пучком. Патент РФ № 2068328 В23К 26/00 оп. 27.10.1996

Додаток до теми 4: Завдання на СРС

1. **Навести технологічні схеми формування** отворів пучком лазерного випромінювання. В яких умовах ефективна та чи інша схема? Які **засоби концентрації променистої енергії** використовуються у цих схемах. Формування пучка випромінювання у резонаторі, його перетворення тонкою сферичною лінзою. Глибина різкості оптичної системи, її вплив на поперечний профіль отвору: за якої умови можна обробити циліндричний отвір?
2. **Що таке обробка у “дальній” зоні:** які отвори за поперечним зрізом можна обробити у “дальній” зоні. Вибрати, накреслити та розрахувати оптичну систему для обробки кільцевої порожнини $\varnothing 10$ мм шириною 0,1 мм пучком випромінювання лазера на гранаті діаметром 10 мм та з кутом розбіжності 0,005 рад. Прийняти показник переломлення матеріалу оптичних елементів рівний $n = 1.5$.
3. **Коли використовується проєкційна схема обробки отворів складної форми у тонких заготовках.** Побудувати оптичну систему для формування пучка лазерного випромінювання складного поперечного профілю та концентрації його енергії на поверхню заготовки. **Вибрати тип та накреслити оптичну схему для проєкційної обробки вікна квадратної поперечної форми 50×50 мкм у плівці з хрому завтовшки 10 мкм на поверхні скляної пластинки.** Випромінювач на рубіні з довжиною хвилі $\lambda = 0.6943$ мкм, діаметром пучка 5 мм з кутом розбіжності з лазером на парах міді, який має коефіцієнт підсилення активного середовища $\alpha = 10^2 \text{ см}^{-1}$.

Додаток до теми 4: Завдання на СРС (подовження)

4. Які можна сформулювати подовжні профілі отворів та лунок та який вплив на нього параметрів опромінення. Формування циліндричної світлової трубки. Скласти оптичну схему для обробки циліндричного отвору діаметром $\varnothing 0,3$ мм у заготовці товщиною $\delta = 3$ мм у циліндричній світловій трубці для таких параметрів пучка випромінювання: діаметр $D = 10$ м, кут розбіжності $\theta = 0,002$ рад, $\lambda = 1,06 \cdot 10^{-3}$ мм.