

МЕТОДИ УЗГОДЖЕННЯ СВІТЛОВОДА З ДЖЕРЕЛОМ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Істотний внесок у втрати випромінювання вносить невідповідність параметрів випромінювача й вхідних характеристик світловода.

Основними факторами, що визначають втрати, є:

- невідповідність геометричних розмірів випромінюючої площини й торця світловода;
- невідповідність кутових розмірів індикатриси випромінювання й числової апертури світловода.

Якщо, наприклад, джерелом випромінювання є люмінесцентний світловипромінюючий діод (СВД), то випромінююча площадка може складатися:

$$S_{свд} = 0,2 \dots 6,6 \text{ (мм}^2\text{)}.$$

Площа вхідного торця осердя світловода складає:

$$S = 2 \cdot 10^{-3} \dots 8 \cdot 10^{-3} \text{ (мм}^2\text{)}.$$

СВД можуть бути використані при введенні випромінювання в джгути, що включають тисячі світловодів. У пристроях вводу випромінювання у ВОЛЗ застосовуються напівпровідникові лазери із плоскою випромінюючою поверхнею або з вбудованою лінзою. Розмір перетяжки лазерного пучка в таких випромінювачах складає 0.8... 0.3 мкм. Для напівпровідникових лазерів геометричне він'єтування відсутнє і залишається тільки кутове він'єтування, обумовлене невідповідністю апертур. Індикатриса СВД має конфігурацію приведену на рис. 1.

Ефективність вводу випромінювання у світловод від СВД і лазерів можна оцінити, користуючись наступним співвідношенням:

$$P_c = k_y \cdot \left(\frac{m+1}{2} \right) \cdot \frac{S_c}{S_o} \cdot (NA)^2 \cdot P_o \quad (1)$$

де P_c - потужність випромінювання, що вводиться у світловод;

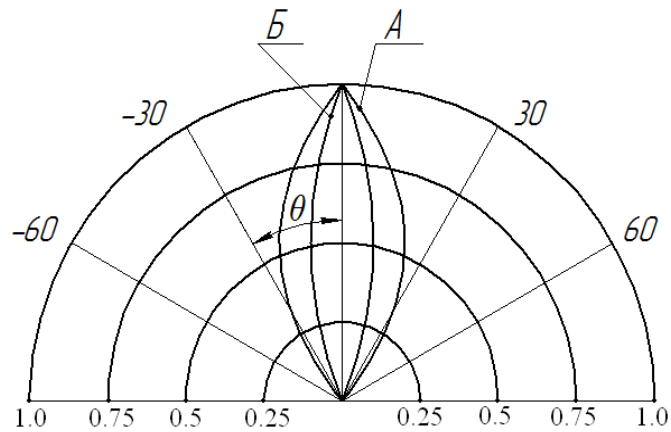


Рис. 1. Індикатриса СВД:

А - без вбудованої лінзи; Б - з вбудованою лінзою

$k_{\text{ц}}$ - коефіцієнт заповнення індикатриси випромінювання;

m - показник ступеня, що характеризує форму індикатриси випромінювання джерела;

S_c - площа осердя волоконного світловода;

S_{δ} - активна площа випромінювання джерела;

NA - числова апертура;

P_{δ} - потужність випромінювання джерела.

Для СВД показник ступеня становить $m=1$, для лазерів $-m=4$.

Для підвищення ефективності вводу випромінювання у світловод застосовуються наступні елементи:

- фокони;
- мікролінзи;
- градієнтні лінзи;
- сферичні лінзи;
- оплавлення торця світловода;
- різні комбінації сферичних і градієнтних лінз.

1. Оцінка ефективності прямого узгодження джерела й світловода

При оцінці втрат при методі прямого стикування необхідно враховувати геометричне й кутове він`єтування.

Методика розрахунку втрат для багатомодового світловода включає наступні розрахунки:

- визначення розмірів перетяжки лазерного пучка по осях ХУ:

$$r_{nx} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_x} ; \quad (2)$$

$$r_{ny} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_y} , \quad (3)$$

де θ_x, θ_y - кутові розміри індикатриси випромінювання лазера в горизонтальній і вертикальній площинах; λ - довжина хвилі випромінювання.

визначення коефіцієнта геометричного він'єтування:

$$\gamma_x = \frac{r_c}{r_{nx}} ; \quad (4)$$

$$\gamma_y = \frac{r_c}{r_{ny}} , \quad (5)$$

де r_c - радіус осердя світловода.

- визначення числової апертури світловода:

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_n^2} . \quad (6)$$

- визначення коефіцієнта кутового він'єтування:

$$\gamma_{\omega x} = \frac{NA}{\theta_x} ; \quad (7)$$

$$\gamma_{\omega y} = \frac{NA}{\theta_y} . \quad (8)$$

- визначення за допомогою номограми, що приведена в табл.1, коефіцієнтів пропускання при відомих значеннях коефіцієнтів геометричного і кутового він'єтування з співвідношення:

$$\tau = \tau_{\gamma x} \cdot \tau_{\gamma y} \cdot \tau_{\gamma \omega x} \cdot \tau_{\gamma \omega y} . \quad (9)$$

У випадку одномодового світловода необхідно враховувати, що оскільки розмір світловода сорозмірний з довжиною хвилі, частина

електромагнітної енергії розповсюджується за межами осердя. Тому вводять поняття ефективного радіуса одномодового світловода, що завжди більше реального.

Для визначення цього радіуса використовується наступне співвідношення:

$$\frac{2r_{\text{еф}}}{d_c} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6}, \quad (10)$$

де d_c - діаметр осердя світловода;

V - нормована частота.

- визначення коефіцієнта лінійного вгнутування з урахуванням ефективного радіуса:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{\text{еф}}}{r_{nx}}; \quad (11)$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_{\text{еф}}}{r_{ny}}. \quad (12)$$

- визначення коефіцієнта пропускання при лінійному вгнутуванні:

$$\tau_l = \left(\frac{2}{\gamma_x + \frac{1}{\gamma_x}} \right) \cdot \left(\frac{2}{\gamma_y + \frac{1}{\gamma_y}} \right). \quad (13)$$

- визначення по номограмі коефіцієнтів τ_{ax} і τ_{ay} .
- визначення коефіцієнта пропускання пристрою вводу випромінювання за допомогою номограми (табл.1):

$$\tau = \tau_l \cdot \tau_{\text{ax}} \cdot \tau_{\text{ay}}. \quad (14)$$

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів пропускання

γ :	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,000 20	020 21	041 20	061 20	081 20	101 20	121 20	141 20	161 20	181 20
0,1	0,201 20	221 19	240 19	259 19	278 19	297 19	316 19	335 18	353 18	371 18
0,2	0,389 18	407 18	425 17	442 17	458 17	475 17	492 17	508 16	524 16	540 15
0,3	0,555 15	570 15	585 14	599 14	613 14	627 14	641 13	654 13	667 12	679 12
0,4	0,691 12	703 12	715 11	726 11	737 11	748 11	759 10	769 10	778 9	787 10
0,5	0,797 9	806 8	814 8	822 9	831 8	839 7	846 7	853 7	860 7	867 6
0,6	0,873 6	879 6	885 5	891 5	896 6	902 5	907 5	912 4	916 5	921 4
0,7	0,925 3	928 4	932 4	936 4	940 4	944 3	947 3	950 3	953 2	955 3
0,8	0,958 3	961 2	963 2	965 2	967 3	970 2	972 2	974 1	975 1	976 1
0,9	0,978 2	980 1	981 1	982 1	983 1	984 1	985 1	986 1	987 1	988 1
1,0	0,989 1	990 1	991 0	991 1	992 0	992 1	993 1	994 0	994 0	994 1
1,1	0,995	995	996	996	996	997	997	997	997	998

	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
1,2	998	998	998	998	998	999	999	999	999	999
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

2 Пристрій вводу випромінювання у світловод із застосуванням фокона

Схема пристрою вводу показана на рис.2.

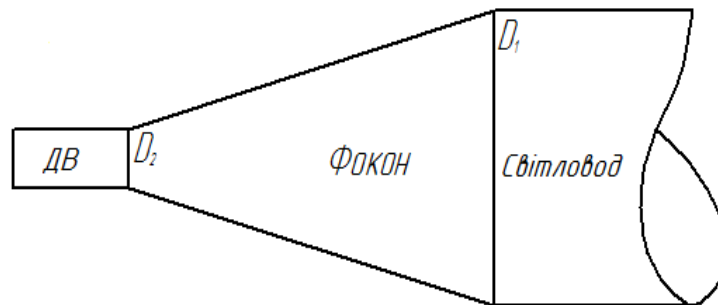


Рис.2. Схема пристрою вводу випромінювання у світловод із застосуванням фокона

Для фокона необхідно визначати оптимальне значення поперечного збільшення, що при використанні багатомодового світловода дорівнює:

$$\alpha^2 = \frac{\left(\frac{r_c}{r_{nx}}\right)^2 + \left(\frac{r_c}{r_{ny}}\right)^2}{\left(\frac{NA}{\theta_x}\right)^2 + \left(\frac{NA}{\theta_y}\right)^2} \quad (15)$$

Поперечне збільшення фокона визначається співвідношенням:

$$\beta = \sqrt{a} \quad (16)$$

де α - поперечне збільшення.

На підставі геометричних розмірів фокона, його поперечне збільшення може бути визначено співвідношенням:

$$\beta = \frac{D_1}{D_2} \Rightarrow D_2 = \frac{D_1}{\beta} \quad (17)$$

Коефіцієнти геометричного він'єтування визначають наступними співвідношеннями:

$$\gamma_x = \frac{r_c}{r_{nx} \cdot \beta}; \quad (18)$$

$$\gamma_y = \frac{r_c}{r_{ny} \cdot \beta}. \quad (19)$$

Між коефіцієнтами кутового й геометричного він'єтування існує наступна залежність:

$$\gamma_{\omega x} = \gamma_y; \quad (20)$$

$$\gamma_{\omega y} = \gamma_x. \quad (21)$$

По номограмі визначають коефіцієнт пропускання, а сумарний коефіцієнт пропускання вузла вводу випромінювання дорівнює:

$$\tau = \tau_{\gamma x} \cdot \tau_{\gamma y} \cdot \tau_{\gamma \omega x} \cdot \tau_{\gamma \omega y}. \quad (22)$$

При введенні випромінювання в одномодовий світловод із застосуванням фокона оптимальне подовжнє збільшення дорівнює:

$$\alpha^2 = \frac{r_{c\epsilon\phi}^2}{r_{nx} \cdot r_{ny}}. \quad (23)$$

Далі визначається поперечне збільшення фокона й радіус малого торця фокона.

Коефіцієнти геометричного він'єтування визначаються по формулах:

$$\gamma_x = \frac{r_{c\epsilon\phi}}{r_{nx} \cdot \beta}; \quad (24)$$

$$\gamma_y = \frac{r_{c\epsilon\phi}}{r_{ny} \cdot \beta}. \quad (25)$$

Коефіцієнти кутового він'єтування визначаються по формулах:

$$\gamma_{\omega x} = \frac{1}{\gamma_y}; \quad (26)$$

$$\gamma_{\omega y} = \frac{1}{\gamma_x} \quad (27)$$

Коефіцієнт пропускання при геометричному він'єтуванні визначається з формули:

$$\tau_{\gamma x, y} = \left(\frac{2}{\gamma_x + \frac{1}{\gamma_x}} \right) \cdot \left(\frac{2}{\gamma_y + \frac{1}{\gamma_y}} \right) \quad (28)$$

Коефіцієнти пропускання при кутовому він'єтуванні визначаються по номограмі (табл.1).

Загальний коефіцієнт пропускання пристрою вводу випромінювання визначається співвідношенням:

$$\tau = \tau_l \cdot \tau_{\omega x} \cdot \tau_{\omega y} \quad (29)$$

3. Узгоджуючі пристрої із застосуванням мікролінз

Як мікролінзи в пристроях вводу випромінювання у світловод застосовують напівсфери й сфери радіуса R . Схема пристрою вводу випромінювання у світловод із застосуванням мікролінз представлена на рис.3.

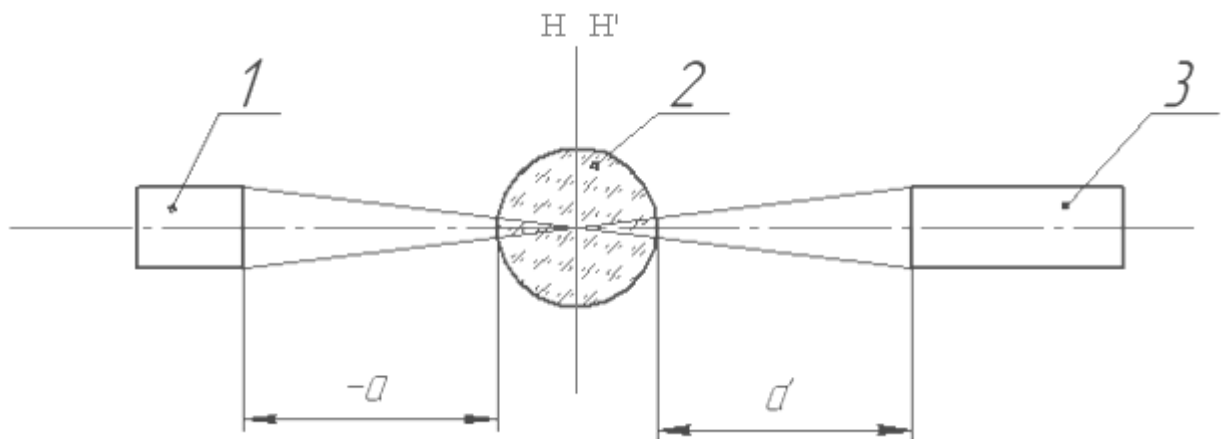


Рис. 3. Схема пристрою вводу із застосуванням мікролінз:

1 - джерело випромінювання; 2 - мікролінза; 3 - світловод.

Кардинальні параметри напівсферичних мікролінз показані на рис. 4 і визначаються по формулах:

$$f' = \frac{R}{n-1} ; \quad (30)$$

$$f' = -S_F ; \quad (31)$$

$$S'_{F'} = \frac{f'}{n} . \quad (32)$$

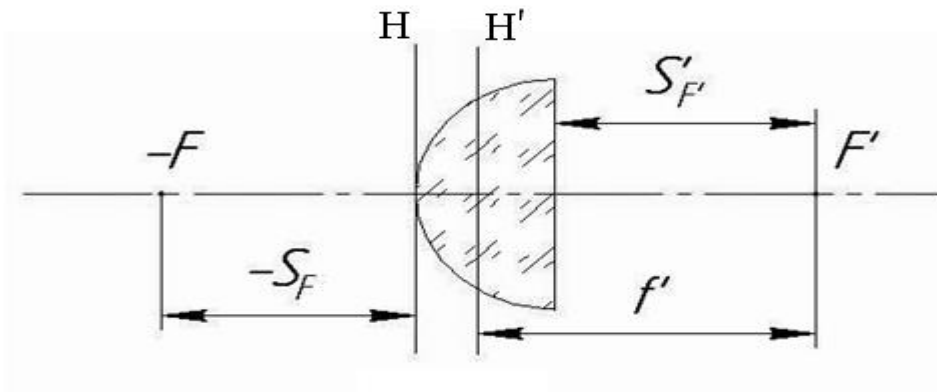


Рис.4. Кардинальні параметри напівсферичних мікролінз

Кардинальні параметри сферичних мікролінз показані на рис. 5 і визначаються по формулах:

$$f' = \frac{R \cdot n}{2(n-1)} ; \quad (33)$$

$$-S_F = S'_{F'} = \frac{R(2-n)}{2(n-1)} . \quad (34)$$

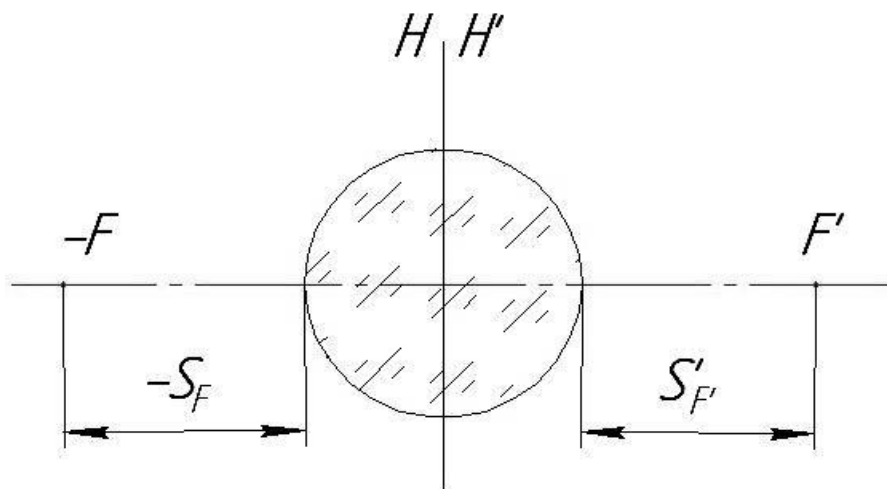


Рис.5. Кардинальні параметри сферичних мікролінз

Якщо мікролінза застосовується для вводу випромінювання в багатомодовий світловод, то її фокусна відстань визначається співвідношенням:

$$(f \cdot f')^2 = \frac{\left(\frac{r_{cx}}{\theta_x}\right)^2 + \left(\frac{r_{cy}}{\theta_y}\right)^2}{\left(\frac{NA_x}{r_{ПХ}}\right)^2 + \left(\frac{NA_y}{r_{ПУ}}\right)^2}, \quad (35)$$

де $r_{cx} = r_{cy} = r_c$ – радіус світловода;

θ_x і θ_y – кути розходження лазерного пучка по двом координатам;

$NA_x = NA_y = NA$ – числова апертура світловода;

$r_{ПХ}$ і $r_{ПУ}$ – радіус перетяжки лазерного пучка.

Радіус перетяжки лазерного пучка визначається зі співвідношень:

$$r_{ПХ} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_x} \quad ; \quad (36)$$

$$r_{ПУ} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \theta_y} \quad . \quad (37)$$

Для подальшого розрахунку необхідно визначити збільшення в перетяжках:

$$\beta_{rx} = \frac{f' \cdot \theta_x}{r_{ПХ}} \quad ; \quad (38)$$

$$\beta_{ry} = \frac{f' \cdot \theta_y}{r_{ПУ}} \quad , \quad (39)$$

де f' – фокусна відстань мікролінзи.

Коефіцієнти лінійного вильєтування визначаються співвідношеннями:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_c}{r_{ПХ} \cdot \beta_{rx}} \quad ; \quad (40)$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_c}{r_{ПУ} \cdot \beta_{ry}} \quad . \quad (41)$$

Коефіцієнти лінійного й кутового вин'єтування для багатомодових світловодів зв'язані співвідношеннями:

$$\gamma_{rx} = \gamma_{oy} ; \quad (42)$$

$$\gamma_{ry} = \gamma_{ox} . \quad (43)$$

Якщо $\gamma < 1,37$ для визначення коефіцієнта пропускання користуються номограмою (табл.1). Якщо $\gamma > 1,37$, то втрат на пропускання немає (вин'єтування немає $\tau = 1$)

Коефіцієнт пропускання пристрою вводу випромінювання визначається наступним співвідношенням:

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry} \cdot \tau_{ox} \cdot \tau_{oy} . \quad (44)$$

Якщо мікролінза вводить випромінювання в одномодовий світловод, то її фокусна відстань визначається співвідношенням:

$$-f \cdot f' = \frac{r_{c.eph.x} \cdot r_{c.eph.y}}{\theta_x \cdot \theta_y} , \quad (45)$$

де $r_{c.eph.x} = r_{c.eph.y} = r_{c.eph}$ – ефективний радіус світловода.

Коефіцієнт лінійного вин'єтування дорівнює:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{c.eph}}{r_{ПХ} \cdot \beta_{rx}} ; \quad (46)$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_{c.eph}}{r_{ПУ} \cdot \beta_{ry}} . \quad (47)$$

Коефіцієнт пропускання при лінійному вин'єтуванні визначається співвідношенням:

$$\tau_{лин} = \left(\frac{2}{\gamma_x + \gamma_y} \right)^2 . \quad (48)$$

Коефіцієнт пропускання при кутовому вин'єтуванні визначають по номограмі (табл.1).

Коефіцієнт пропускання пристрою вводу випромінювання у світловод визначається співвідношенням:

$$\tau = \tau_{лин} \cdot \tau_{ox} \cdot \tau_{oy} . \quad (49)$$

4. Пристрій узгодження із застосуванням градієнтних лінз або селфока

Градієнтна лінза - це циліндр з діаметром 2 - 4мм, у якого показник заломлення від центра до краю змінюється за певним законом. Один з найбільш використовуваних законів має наступний вигляд:

$$\frac{n(y)}{n_0} = 1 - 0.5g^2 y^2, \quad (50)$$

де $n(y)$ - характеристика залежності ППП від центра до краю селфока;

n_0 - показник заломлення в центрі селфока;

y - координата, перпендикулярна до оптичної осі;

g - коефіцієнт, що враховує фокусуєчі властивості селфока.

У середині селфока траєкторія луча являє собою гармонічну функцію. Вид цієї функції - рішення диференціального рівняння:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = -\Phi \cdot y, \quad (51)$$

де Φ - оптична сила селфока;

z - координата в напрямку його осі.

В окремому випадку траєкторія луча в селфоці описується рівнянням:

$$y(z) = y_0 \cos(\Phi \cdot z) - \frac{\sigma_0}{\Phi} \cdot \sin(\Phi \cdot z) \quad (52)$$

де y_0 і σ_0 - лінійна й кутова координати луча при $z = 0$.

Хід променів у селфоці показаний на рис. 4.6.

Передня і задня фокусні відстані селфока довжиною d , а також верхинні відрізки селфока можуть бути визначені зі співвідношень:

$$-\frac{1}{n \cdot f} = \frac{1}{n' \cdot f'} = \left(\frac{\Phi}{n_0} \right) \cdot \sin(d \cdot \Phi) \quad ;$$

(4.53)

$$n \cdot S_H = -n' \cdot S'_H = \left(\frac{n_0}{\Phi} \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{d \cdot \Phi}{2} \right),$$

де n , n' і n_0 – показники заломлення в площині предметів, площині зображень і в центрі селфока.

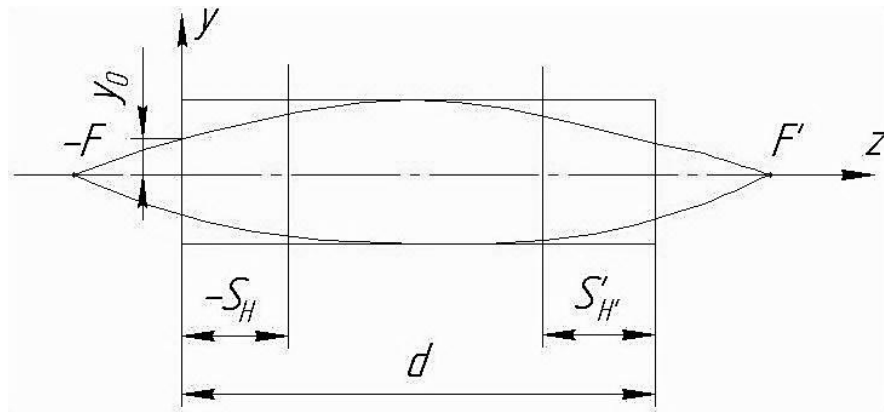


Рис.6. Хід променів у селфоці

Фокуруючі властивості селфока залежать від його довжини. На рис. 7 показані фокуруючий і колімуючий селфоки.

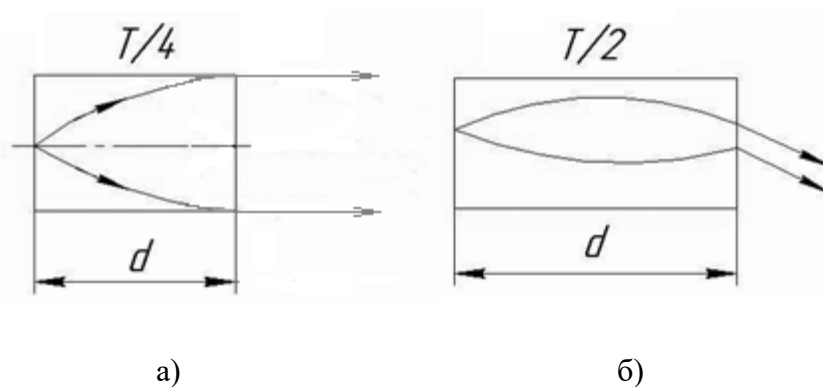


Рис.7. Хід променів у селфоці: а) колімуючому; б) фокууючому

Розрахунок селфоків без застосування спеціальних програм можна робити при застосуванні їх відповідно до спрощених схем, які показані на рис. 8.

Предметний відрізок a для селфока визначається наступним співвідношенням:

$$a = \frac{\cos(d \cdot g) - \frac{1}{\beta}}{g \cdot \sin(d \cdot g)} \quad , \quad (55)$$

де d - довжина селфока;

g - коефіцієнт, що визначає фокусуючу властивість селфока.

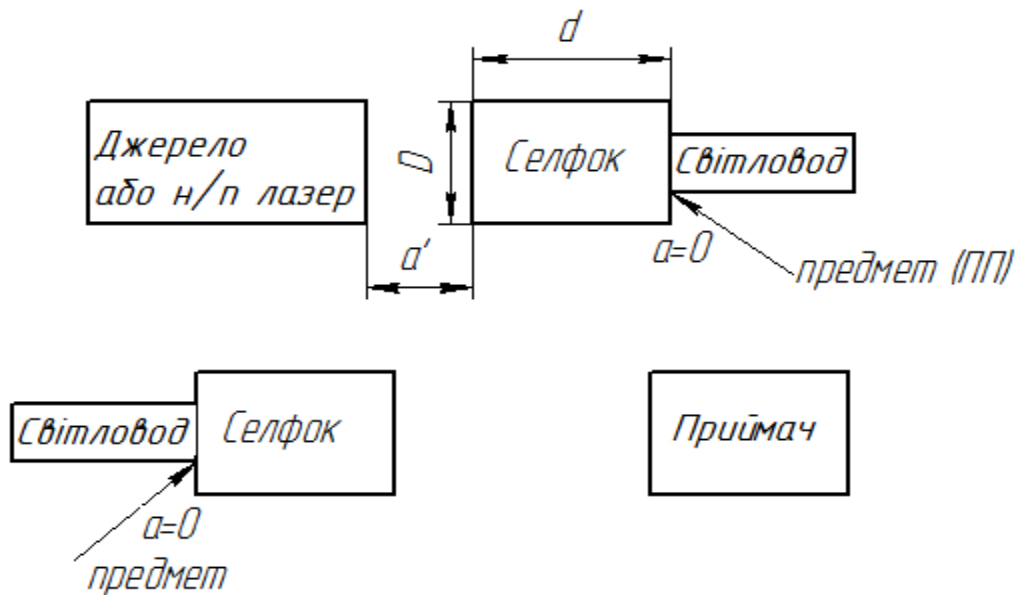


Рис. 8. Спрощені схеми використання селфоків

Збільшення селфока для схеми пов'язаної з джерелом випромінювання і представленої на рис. 4.8, визначається наступним співвідношенням:

$$\beta = \frac{d_o}{d_c} \quad , \quad (56)$$

де d_o – діаметр випромінюючої площини джерела випромінювання ;
 d_c – діаметр осердя світловода.

Збільшення селфока для схеми пов'язаної з фотоприймачем випромінювання і представленої на рис.4.8 визначається наступним співвідношенням:

$$\beta = \frac{d_{np}}{d_c} \quad , \quad (57)$$

де d_{np} – діаметр чутливої площини фотоприймача.

Зі співвідношення, що визначає залежність показника заломлення від поперечної координати, маємо:

$$\frac{n(y_{\max})}{n_0} = 1 - 0.5g^2 y_{\max}^2 \quad . \quad (58)$$

При відомих значеннях n_0 , $n(y_{\max})$ і y_{\max} , коефіцієнт, що визначає фокусуєчу властивість селфока, розраховують по формулі:

$$g^2 = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{n(y_{\max})}{n_0}\right)}{y_{\max}^2} . \quad (59)$$

Скориставшись співвідношенням (4.55), прийнявши $a = 0$, отримаємо:

$$\cos(d \cdot g) - \frac{1}{\beta} = 0 ; \quad (60)$$

$$\arccos \frac{1}{\beta} = d \cdot g \text{ (рад)} . \quad (61)$$

Довжину селфока з урахуванням співвідношення (4.61) визначають по формулі:

$$\frac{\arccos \frac{1}{\beta}}{g} = d . \quad (62)$$

Відстань від вихідного торця селфока до площини випромінювача або фотоприймача визначається співвідношенням:

$$d = \frac{\cos(d \cdot g) - \frac{\beta}{2}}{g \cdot \sin(d \cdot g)} . \quad (63)$$

5. Застосування сферичних лінз

У деяких випадках для вводу випромінювання у світловод застосовують звичайні сферичні лінзи. Схема застосування таких лінз показана на рис.9.

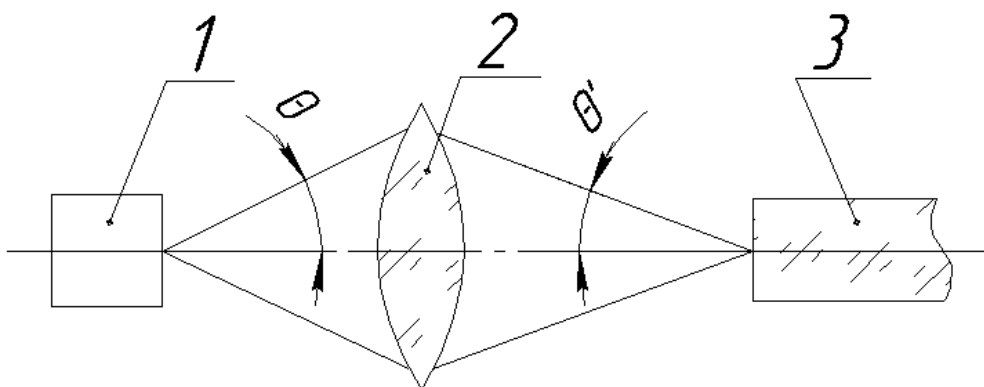


Рис.9. Схема застосування сферичної лінзи:

1- випромінювач; 2 - лінза; 3 - світловод.

При розрахунку пристрою вводу випромінювання необхідно вирішити завдання узгодження по площі й по апертурі випромінювача й світловода.

Втрати випромінювання в цьому випадку можна визначити по формулі :

$$\Pi = 10 \lg \frac{P_o}{P_c} = 10 \lg \left(\frac{2S_o}{(m+1) \cdot S_c \cdot (NA)^2} \right) , \quad (64)$$

де P_o – потужність випромінювання джерела;

P_c – потужність, що введена у світловод;

S_o – площа випромінюючої площини джерела;

S_c – площа вхідного торця осердя світловода;

m – коефіцієнт, що враховує рівень потужності на краю діаграми спрямованості джерела.

Якщо $S_c > S_o$, то можна вважати відношення $\frac{S_o}{S_c} = 1$. Якщо одна з координат $y < r_{ce}$, то втрати випромінювання можна визначити, порівнюючи не площі, а лінійні розміри джерела й світловода. Тоді:

$$\Pi = 10 \cdot \lg \cdot \left[\frac{2 \cdot x}{(m+1) \cdot r_c \cdot (NA)^2} \right] \text{ дБ.} \quad (65)$$

Ступінь кутового він'єтування залежить від кутових розмірів індикатриси випромінювання джерела й числової апертури світловода. Параметр, що характеризує кутові розміри індикатриси (m), може бути

визначений на підставі допущення про необхідну потужність випромінювання на краю діаграми спрямованості.

Для практичних розрахунків можна прийняти, що:

$$P(\theta) = P_0 \cos^m \theta, \quad (66)$$

де P_0 – потужність випромінювання по центру індикатриси випромінювання джерела;

$P(\theta)$ – потужність випромінювання індикатриси під кутом θ відносно осі.

Якщо прийняти, що виконується співвідношення:

$$\frac{P(\theta)}{P_0} = \cos^m \theta = 0,5, \quad (67)$$

тоді

$$m \cdot \lg \cos \theta = \lg 0,5, \quad (68)$$

$$m = \frac{\lg 0,5}{\lg \cos \theta}, \quad (69)$$

де θ – кут розходження лазерного пучка по вертикалі.

Якщо для зменшення втрат використовується сферична лінза, то вона змінює кутові розміри індикатриси джерела випромінювання. Індикатриса зменшується й стає рівною числовій апертурі світловода. На рис.10 показана схема вводу випромінювання у світловод для даного випадку.

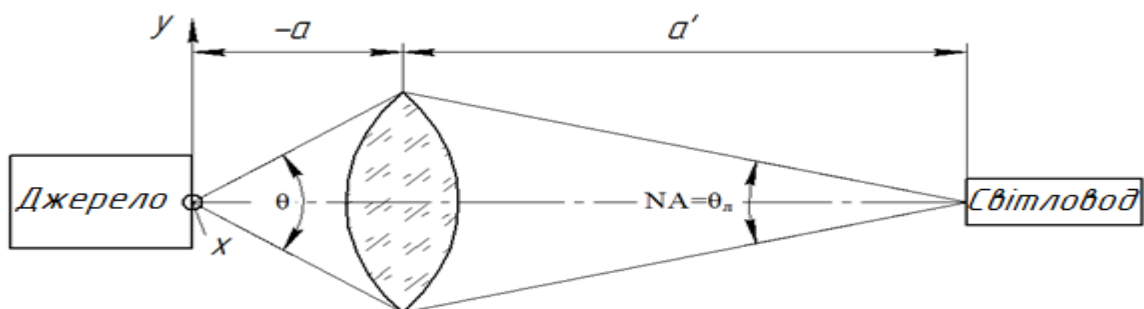


Рис.10. Схема вводу випромінювання у світловод з використанням сферичної лінзи

У цьому випадку використовується нове значення m_1 , що дорівнює:

$$m_1 = \frac{\lg 0,5}{\lg \cdot \cos(NA)} \quad (70)$$

Для визначення конструктивних параметрів сферичної лінзи, а також розташування джерела й приймача, використовують наступні співвідношення:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \quad ; \quad (71)$$

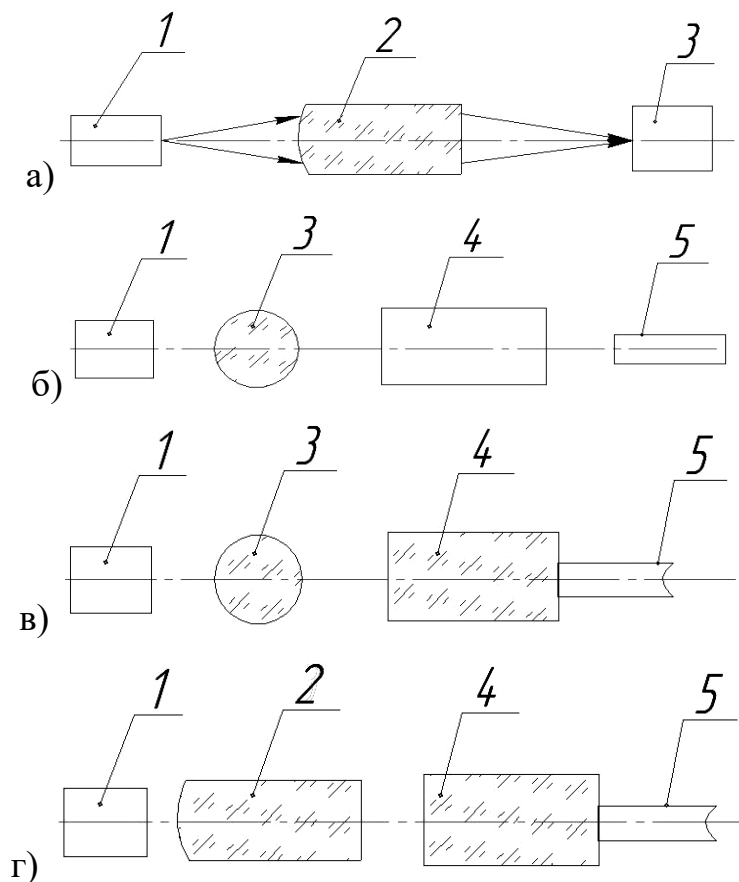
$$a' = \beta \cdot a \quad ; \quad (72)$$

$$\beta = \frac{d_c}{x} \quad ; \quad (73)$$

$$d = \frac{R(1 + \beta)}{2(n - 1)} \quad (74)$$

6 Ввод випромінювання у світловод комбінаціями лінз

Схеми застосування комбінації лінз для вводу випромінювання у світловод показані на рис.11.



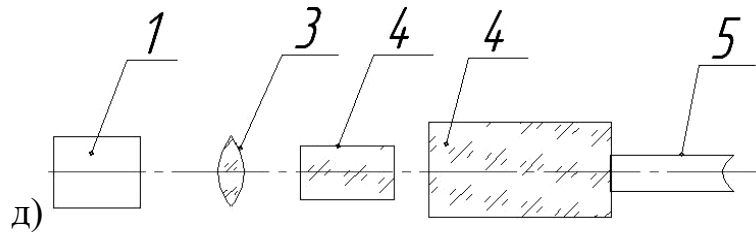


Рис.11. Застосування комбінацій лінз для вводу випромінювання:

- 1 - джерело випромінювання; 2 - градієнтна лінза або селфок;
- 3 - сферична мікролінза; 4 - селфок; 5 - одномодовий світловод.

Схема використання двох сферичних лінз для вводу випромінювання у світловод показана на рис 12.

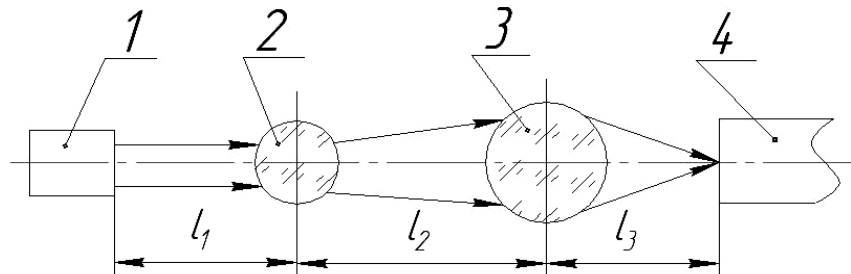


Рис. 12. Схема використання сферичних лінз:

- 1-лазер; 2- сферична лінза 1; 3 - сферична лінза 2; 4 - світловод.

Втрати в пристрої вводу багато в чому залежать від децентрування торця світловода 5, який сприймає випромінювання від джерела.

Допустима величина децентрування по двох вісях для одномодового світловода визначається співвідношеннями:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{r_{\text{эф}}^2 + r_{\text{nx}}^2}{2}} ; \tag{75}$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{r_{\text{эф}}^2 + r_{\text{ny}}^2}{2}} . \tag{76}$$

Допустимі значення децентрування і можливі втрати для представлених на рис.12 схем приведені в табл.2.

Таблиця 2.

Допустимі значення похибок з'єднання світловодів

Схема	Втрати, дБ	Децентрування, мкм	Перекося, кут. хв.	Зсув уздовж осі, мкм
а	4,5	-	-	-
б	3,6	-	-	-
в	4,1	9,8	1	700
г	5,2	12,5	1,2	800
Д	3	10,7	1,1	1000

Зміна конструкції торця світловода робиться методом фотолітографії. Сферична або близька до неї поверхня виготовляється на плоскому торці одномодового світловода. Технологія одержання таких елементів полягає в тому, що після видалення захисного покриття торець одномодового світловода травлять у кислоті. Потім протравлену ділянку містять у фокус лазера з імпульсною потужністю 25 Вт. Під дією випромінювання, що поглинається, торець світловода оплавляється і, внаслідок поверхневого натягу, утворюється лінза.

7. Приклади розрахунків пристроїв узгодження

Приклад 1. Визначити ефективність прямого стикування напівпровідникового лазера з одномодовим і багатомодовим світловодами при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,3\text{мкм}$, $\Theta_x=0,15\text{рад}$, $\Theta_y=0,5\text{рад}$.;

багатомодовий світловод - $d=50\text{мкм}$, $n_c=1,471$, $n_n=1,457$;

одномодовий світловод – $d=12\text{мкм}$, $n_c=1,459$, $n_n=1,457$.

Розв'язок

Скористаємося співвідношеннями (2-9).

Розміри перетяжки лазерного променя:

$$r_{nx} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \Theta_x} = \frac{1,3}{3,14 \cdot 0,15} = 2,76 \text{ мкм}$$

$$r_{ny} = \frac{\lambda}{\pi \cdot \Theta_y} = \frac{1,3}{3,14 \cdot 0,5} = 0,83 \text{ мкм}$$

Лінійне він'єтування для багатомодового світловода:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{cb}}{r_{nx}} = \frac{25}{2,76} = 9$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_{cb}}{r_{ny}} = \frac{25}{0,83} = 30$$

Числова апертура багатомодового світловода

$$NA = \sqrt{n_c^2 - n_n^2} = \sqrt{(1,471)^2 - (1,457)^2} = 0,202$$

Коефіцієнти кутового він'єтування:

$$\gamma_{\omega x} = \frac{NA}{\Theta_x} = \frac{0,202}{0,15} = 1,35$$

$$\gamma_{\omega y} = \frac{NA}{\Theta_y} = \frac{0,202}{0,5} = 0,404$$

Скориставшись номограмою з табл.1, визначимо коефіцієнт втрат для цього випадку.

$$\tau_{\omega y} = 0,696$$

Загальний коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry} \cdot \tau_{\omega x} \cdot \tau_{\omega y} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,696 = 69,6\%$$

Визначимо аналогічні втрати для одномодового світловода, скориставшись формулами (10-14).

Ефективний радіус одномодового світловода визначається із співвідношень:

$$\frac{2r_{эфф}}{d_{cb}} = 0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6},$$

де V -нормована частота.

$$V = \frac{3,14 \cdot 12}{1,3} \cdot \sqrt{(1,459)^2 - (1,457)^2} = 2,21$$

$$\frac{2r_{\text{эфф}}}{12} = 0,65 + \frac{1,619}{(2,21)^{3/2}} + \frac{2,879}{(2,21)^6}$$

$$r_{\text{эфф}} = 6,99 \text{ мкм}$$

Визначимо коефіцієнт лінійного він'єтування:

$$\gamma_{rx} = \frac{r_{\text{эфф}}}{r_{nx}} = \frac{6,99}{2,76} = 2,55$$

$$\gamma_{ry} = \frac{r_{\text{эфф}}}{r_{ny}} = \frac{6,99}{0,83} = 8,42$$

Коефіцієнт пропускання при лінійному він'єтуванні дорівнює:

$$\tau_n = \left(\frac{2}{\gamma_{rx} + 1/\gamma_{rx}} \right) \cdot \left(\frac{2}{\gamma_{ry} + 1/\gamma_{ry}} \right) = 0,16 = 16\%$$

Числова апертура і коефіцієнти кутового він'єтування одномодового світловода дорівнюють:

$$NA = \sqrt{(1,459)^2 - (1,457)^2} = 0,076$$

$$\gamma_{\omega x} = \frac{NA}{\Theta_x} = \frac{0,076}{0,15} = 0,51$$

$$\gamma_{\omega y} = \frac{NA}{\Theta_y} = \frac{0,076}{0,5} = 0,15$$

Скориставшись номограмою з табл.4.1, визначимо коефіцієнт втрат для цього випадку.

$$\tau_{\omega x} = 0,803 \quad \tau_{\omega y} = 0,300$$

Загальний коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry} \cdot \tau_{\omega x} \cdot \tau_{\omega y}$$

$$\tau_n = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry}$$

$$\tau = 0,16 \cdot 0,803 \cdot 0,301 = 0,04 = 4\%$$

Приклад 2. Визначити ефективність стикування напівпровідникового лазера з одномодовим і багатомодовим світловодами за допомогою фокона при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,3\text{мкм}$, $\Theta_x=0,15\text{рад}$, $\Theta_y=0,5\text{рад}$.;

багатомодовий світловод - $d=50\text{мкм}$, $n_c=1,471$, $n_n=1,457$;

одномодовий світловод – $d=12\text{мкм}$, $n_c=1,459$, $n_n=1,457$.

Розв'язок

Скориставшись формулами (15-22) для багатомодового світловода отримаємо наступне.

Оптимальне значення продовжнього збільшення α з урахуванням поперечного збільшення β дорівнює:

$$\beta = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\alpha^2 = \frac{\left(\frac{25}{2,76}\right)^2 + \left(\frac{25}{0,83}\right)^2}{\left(\frac{0,202}{0,15}\right)^2 + \left(\frac{0,202}{0,5}\right)^2} = 522$$

$$\alpha = 22,85$$

$$\beta = \sqrt{22,3} = 4,78$$

$$D_2 = \frac{D_1}{\beta} = \frac{50}{4,7} = 10,46\text{км}$$

Визначимо коефіцієнти лінійного він'єтування:

$$\gamma_{rx} = \frac{25}{2,76 \cdot 4,8} = 1,93$$

$$\gamma_y = \frac{25}{0,83 \cdot 4,78} = 6,4$$

Коефіцієнти кутового він'єтування дорівнюють:

$$\gamma_{oy} = \gamma_{rx} = 1,93$$

$$\gamma_{ox} = \gamma_{ry} = 6,4$$

Скориставшись номограмою з табл..1 визначимо коефіцієнт втрат для цього випадку.

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{ry} \cdot \tau_{\omega x} \cdot \tau_{\omega y}$$

$$\tau = 1 = 100\%$$

Визначимо аналогічні втрати для одномодового світловода скориставшись формулами (23-29). Продовжнє збільшення α дорівнює:

$$\alpha_r = \frac{7 \cdot 7}{2,76 \cdot 0,83} = 21,67$$

Поперечне збільшення і коефіцієнти він'єтування фокона визначимо із співвідношень $\beta = \sqrt{\alpha} = 4,6$

$$\gamma_{rx} = \frac{7}{2,76 \cdot 4,6} = 0,55 \quad \gamma_{\omega x} = \frac{1}{0,55} = 1,81$$

$$\gamma_{ry} = \frac{7}{0,83 \cdot 4,6} = 1,8 \quad \gamma_{\omega y} = \frac{1}{1,8} = 0,55$$

Втрати при лінійному він'єтуванні дорівнюють:

$$\tau_{\Lambda} = \left[\frac{2}{(0,55 + 1,81)} \right]^2 = 0,72$$

Скориставшись номограмою з табл.1, визначимо коефіцієнт втрат для кутового він'єтування

$$\gamma_{\omega y} = 0,5; \quad \tau_{\omega y} = 0,839$$

Тоді загальний коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\tau = \tau_{rx} \cdot \tau_{\omega y} = 0,72 \cdot 0,839 = 0,6 \approx 60\%$$

Приклад 3. Визначити ефективність стикування напівпровідникового лазера з одномодовим і багатомодовим світловодами за допомогою мікролінз при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,3\text{мкм}$, $\Theta_x=0,15\text{рад}$, $\Theta_y=0,5\text{рад}$.;

багатомодовий світловод - $d=50\text{мкм}$, $n_c=1,471$, $n_n=1,457$;

одномодовий світловод – $d=12\text{мкм}$, $n_c=1,459$, $n_n=1,457$;

показник заломлення лінзи - $n_\Lambda=1.457$.

Розв'язок

Скористаємося формулами (35-44) для визначення втрат при вводиті випромінювання в багатомодовий світловод.

Фокусна відстань мікролінз дорівнює:

$$ff' = \sqrt{\frac{\left(\frac{25}{0,15}\right)^2 + \left(\frac{25}{0,5}\right)^2}{\left(\frac{0,202}{2,76}\right)^2 + \left(\frac{0,202}{0,83}\right)^2}} = \sqrt{\frac{27778 + 2500}{0,005 + 0,06}} \approx 696\text{мкм}^2$$

$$f = f' = 26\text{мкм}$$

Для напівсфери отримаємо $R = 26 \cdot 0,457 \approx 12\text{мкм}$

Для сфери отримаємо $R = \frac{26 \cdot 2 \cdot 0,457}{1,457} \approx 16,5\text{мкм}$

Збільшення в перетяжках та коефіцієнти він'єтування дорівнюють:

$$\beta_{rx} = \frac{f' \cdot \Theta_x}{r_{nx}} = \frac{26 \cdot 0,15}{2,76} = 1,42$$

$$\beta_{ry} = \frac{f' \cdot \Theta_y}{r_{ny}} = \frac{26 \cdot 0,5}{0,83} = 15,78$$

$$\gamma_{rx} = \gamma_{ry} = \frac{r_c}{r_{nx} \beta_{rx}} = \frac{25}{2,76 \cdot 1,42} = 6,38$$

$$\gamma_{ry} = \gamma_{ry} = \frac{r_c}{r_{ny} \beta_{ry}} = \frac{25}{0,83 \cdot 15,78} = 1,91$$

$$\tau = 100\%$$

Для одномодового світловода скористаємося формулами (45-49). Фокусна відстань мікролінз дорівнює:

$$f' = \sqrt{\frac{r_{cx} \cdot r_{cy}}{\Theta_x \cdot \Theta_y}} = \sqrt{\frac{6,73^2}{0,15 \cdot 0,5}} = 24,6 \text{ мкм}$$

Визначимо поперечне збільшення мікролінзи в перетяжках:

$$\beta_{rx} = \frac{24,6 \cdot 0,15}{2,76} = 1,34$$

$$\beta_{ry} = \frac{24,6 \cdot 0,5}{0,83} = 15,4$$

Визначимо коефіцієнти лінійного він'єтування:

$$\gamma_{rx} = \frac{6,73}{2,76 \cdot 1,34} = 1,82$$

$$\gamma_{ry} = \frac{6,73}{0,83 \cdot 15,4} = 0,55$$

Коефіцієнт пропускання при лінійному він'єтуванні дорівнює (табл.1)

$$\tau_{\Lambda} = 0,75$$

Коефіцієнти кутового він'єтування:

$$\gamma_{\omega x} = 0,55; \quad \gamma_{\omega y} = 1,82$$

З табл.4.1 знайдемо

$$\tau_{\omega x} = 0,75 \quad ; \quad \tau_{\omega y} = 1$$

Тоді загальний коефіцієнт пропускання дорівнює:

$$\tau = \tau_{\Lambda} \cdot \tau_{\omega x} \cdot \tau_{\omega y} = 0,56$$

Приклад 4. Визначити ефективність стикування напівпровідникового лазера з одномодовим світловодом, а також світловода с фотоприймальним модулем за допомогою градієнтної лінзи при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,3\text{мкм}$, діаметр випромінюючої зони $d_u = 100\text{мкм}$;

приймач випромінювання ЛФДГ70- $\lambda=1,3\text{ мкм.}$, $d_n \sim 70\text{мкм.}$;

одномодовий світловод – $d=10\text{мкм}$, $n_c=1,459$, $n_n=1,457$;

градієнтна лінза - $n_0 = 1.5$; $n_y = 1.45$; $D_c = 2 \div 3\text{мм}$.

Розв'язок

Розрахунок селфоків будемо виконувати відповідно до схем приведених на рис.8 і скориставшись формулами (55-63).

Визначимо збільшення селфоків:

- по схемі рис.8 для узгодження з джерелом випромінювання

$$\beta_a = -\frac{d_n}{d_c} = -\frac{100}{10} = -10^* ;$$

по схемі рис.4.8 для узгодження з фотоприймачем

$$\beta_b = -\frac{d_{np}}{d_c} = -\frac{70}{10} = -7^* .$$

Прийmemo для першої схеми на рис.4.8 $D_c = 3\text{мм} \Rightarrow y = 1,5\text{мм}$, а для другої схеми на рис.8 $D_c = 2\text{мм} \Rightarrow y = 1\text{мм}$.

Підставивши вихідні дані, отримаємо:

- перша схема на рис.8

$$g_a = \sqrt{\frac{2(1 - \frac{1.45}{1.5})}{1.5^2}} = 0.172\text{мм}^{-1};$$

- друга схема на рис.4.8

$$g_b = \sqrt{\frac{2(1 - \frac{1.45}{1.5})}{1^2}} = 0.258\text{мм}^{-1} .$$

Оскільки $a=0$, то отримаємо:

$$\frac{1}{\beta} - \cos dg = 0.$$

Для першої схеми на рис.8 отримаємо:

$$\cos dg = -\frac{1}{10}$$

$$dg = 84^\circ; dg = 1.45 \text{ рад}$$

$$d_a = \frac{1.45}{0.172 \text{ мм}^{-1}} = 8.43 \text{ мм.}$$

Для другої схеми на рис.8 отримаємо :

$$\cos dg = -\frac{1}{7}$$

$$dg = 82^\circ; dg = 1.4 \text{ рад}$$

$$d_a = \frac{1.4}{0.258 \text{ мм}^{-1}} = 5.43 \text{ мм.}$$

Відстань від вхідного торця селфока до випромінювача і фотоприймача дорівнює:

- для першої схеми на рис.8

$$S' = \frac{-0.1 + 5}{0.172 * 0.99} = 24 \text{ мм.}$$

- для другої схеми на рис 8

$$S' = \frac{-0.14 + 3.5}{0.258 * 0.99} = 13.5 \text{ мм.}$$

Таким чином для конструктивних параметрів системи вводу-виводу випромінювання за допомогою селфока отримаємо:

• для першої схеми на рис.8

$$d_{\text{сел}} = 8,43 \text{ мм}; D_{\text{сел}} = 3 \text{ мм}; \begin{matrix} S' = 24 \text{ мм} \\ S = 0 \end{matrix}$$

• для другої схеми на рис.8

$$d_{\text{сел}} = 5,43 \text{ мм}; D_{\text{сел}} = 2 \text{ мм}; \begin{matrix} S' = 13.5 \text{ мм} \\ S = 0 \end{matrix}$$

Приклад 5. Визначити ефективність прямого стикування напівпровідникового лазера з багатомодовим світловодом зі стикуванням за допомогою сферичної лінзи при наступних вихідних даних:

лазер - розмір зони випромінювання $x=30\text{мкм}$; $y=3\text{мкм}$;

розходження випромінювання $\theta_x = 9^\circ$; $\theta_y = 30^\circ$;

приймач випромінювання ЛФДГ70- $\lambda=1,3\text{мкм}$, $d_n \sim 70\text{мкм}$;

світловод – $d_c = 50\text{мкм}$; $U = 11^\circ 30'$;

сферична лінза - $f' = 16\text{мм}$; $R_1 = R_2$; $n = 1.5$.

Розв'язок

Вдповідно до вихідних даних має місце неузгодженість між індикатрисою випромінювання напівпровідникового лазера і числовою апертурою світловода в напрямку осі U . Знайдемо показник ступеня m згідно співвідношень (67) і (68). Відповідно до цих співвідношень, після взяття логарифма, отримаємо:

$$m = \frac{\lg 0.5}{\lg \cos \theta}.$$

Підставивши значення кута $\theta = 30^\circ$, отримаємо:

$$m = 4,816.$$

Відповідно до формули (65) визначимо втрати в даному випадку:

$$П = 10 \lg \left[\frac{2 \cdot 30}{(4.816 + 1) 25 (0.2)^2} \right] = 10.1 \text{дБ}$$

Для зменшення втрат може бути використана сферична лінза, що змінює кутові розміри діаграми спрямованості випромінювання лазера. Схема використання лазера приведена на рис.10. Визначимо радіуси лінзи:

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{при } R_1 = R_2$$

$$R_1 = R_2 = 64 \text{ мм}$$

$$R_1 = R_2 = 0,5 \cdot 2f' = f' = 16 \text{ мм}$$

Визначимо коефіцієнт m для перетвореної індикатриси:

$$m = \frac{\lg 0.5}{\lg \cos 11^{\circ} 30'} = \frac{0.301}{0.0088} = 34.2.$$

Тоді втрати при використанні сферичної лінзи наступні:

$$П = 10 \lg \left[\frac{2 \cdot 30}{(34.2 + 1) 25 (0.2)^2} \right] = 2.3 \text{ дБ}.$$

Завдання для самостійної роботи

Задача 1. Визначити ефективність стикування напівпровідникового лазера з одномодовим і багатомодовим світловодами за допомогою фокона при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,5\text{мкм}$; $\Theta_x=0,15\text{рад}$; $\Theta_y=0,4\text{рад}$;

багатомодовий світловод - $d=60\text{мкм}$; $n_c=1,471$; $n_n=1,457$;

одномодовий світловод – $d=10\text{мкм}$; $n_c=1,459$; $n_n=1,457$.

Задача 2. Визначити ефективність стикування напівпровідникового лазера з одномодовим і багатомодовим світловодами за допомогою мікролінз при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,5\text{мкм}$; $\Theta_x=0,2\text{рад}$; $\Theta_y=0,4\text{рад}$;

багатомодовий світловод - $d=60\text{мкм}$; $n_c=1,471$; $n_n=1,457$;

одномодовий світловод – $d=10\text{мкм}$; $n_c=1,459$; $n_n=1,457$;

показник заломлення лінзи - $n_\Lambda=1.5$.

Задача 3. Визначити ефективність стикування напівпровідникового лазера з одномодовим світловодом, а також світловода с фотоприймальним модулем за допомогою градієнтної лінзи при наступних вихідних даних:

лазер - $\lambda=1,5\text{мкм}$, діаметр випромінюючої зони $d_u = 100\text{мкм}$;

приймач випромінювання ЛФДГ - $\lambda=1,3\text{мкм}$; $d_n \sim 90\text{мкм}$;

одномодовий світловод – $d=8\text{мкм}$; $n_c=1,459$; $n_n=1,457$;

градієнтна лінза - $n_0 = 1.5$; $n_y = 1.45$; $D_c = 2 \div 3\text{мм}$.