

УДК 621.391.81:519.584

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА З БАГАТЬМА СЕРЦЕВИНАМИ



[Н.А. ОДЕГОВ](#), [І.В. ТАТАРНИЦЬКА](#)

Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку

Abstract – The paper considers a simplified method for calculating the geometric parameters of an optical fiber with many cores. Such a fiber allows for an increase in the throughput of fiber-optic transmission systems by the method of spatial multiplexing. The proposed technique is based on the concept of light energy distribution in the mode spot and the allowable level of mutual influence between different cores. Algorithmic and software that implements the proposed technique has been developed. A comparative analysis of the triangulation and rectangular structure of fiber with many cores was performed. The technique considers the influence options from the nearest cores and the far layers cores. The analysis of the stability of the received results to minor deviations of actual parameters from the accepted ones in the model is executed. The technique is resistant to minor deviations in the shape of the cores from the circular and to small bends of the optical fiber. The method's theoretical basis is used representations of wave optics and relatively simple representations of geometric optics. The obtained formulas are quite simple to analyze. Therefore, the obtained results can be offered for fast analysis of complex geometric structures of an optical fiber with many cores. Direct measurements or more complex theories compared the obtained results with the known estimates. It is shown that more than 100 cores can be concentrated in a fiber with a diameter of 200-400 μm , taking into account the typical values of noise in real fiber-optic transmission systems. That is, with a slight increase in the size of the optical cable, you can increase the total transmission rate by more than 100 times.

Анотація – В роботі розглядається спрощена методика розрахунку геометричних параметрів оптичного волокна з багатьма серцевинами. Таке волокно дозволяє підвищити пропускну здатність волоконно-оптичних систем передачі методом просторового мультиплексування. В основі запропонованої методики покладено поняття розподілу енергії світла у модовій плямі та допустимого рівня взаємного впливу між різними серцевинами. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення, що реалізує запропоновану методику. Виконано порівняльний аналіз триангуляційної та прямокутної структури волокна з багатьма серцевинами. Методика враховує варіанти впливу як від найближчих серцевин, так і від серцевин з дальніх шарів. Виконано аналіз стійкості отримуваних результатів до малих відхилень реальних параметрів від прийнятих в моделі. Методика стійка до малих відхилень форми серцевин від кругової та до малих вигинів оптичного волокна. Як теоретична основа методики використовуються уявлення хвильової оптики та досить прості уявлення геометричної оптики. Отримані формули доволі прості для аналізу. Тому отримані результати можна пропонувати для експрес-аналізу складних геометричних структур оптичного волокна з багатьма серцевинами. Виконано порівняння отриманих результатів з відомими оцінками, які даються прямими вимірюваннями або більш складними теоріями. Показано, що при врахуванні типових значень шумів у реальних волоконно-оптичних системах передачі у волокні діаметром 200-400 мкм можна зосередити більше 100 серцевин. Тобто, при несуттєвому збільшенні габаритів оптичного кабелю можна підвищити сумарну швидкість передачі більш ніж у 100 разів.

Вступ

Подальший розвиток волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) можливий як за умов удосконалення телекомунікаційного обладнання, так і за допомогою використання більш досконалого середовища передачі – оптичного волокна (ОВ) [1, 2]. Серед перспективних напрямків вирішення останньої задачі розглядаються різні типи мікроструктурованого ОВ.

Можна вважати, що перші дослідження в цьому напрямку полягали у теоретичних і практичних дослідженнях ОВ з градієнтним профілем коефіцієнта заломлення (КЗ) серцевини [3-6]. Мета таких досліджень – зменшення впливу модової дисперсії,

що характерна для багатомодового ОВ. Більш сучасні дослідження присвячуються розробці теорії ОВ з мікробертальною структурою [7-9]. Вони націлені на зменшення впливу поляризаційної модової дисперсії, яка виникає як у багатомодових, так і в одномодових ОВ та має некерований, випадковий характер.

Окрему групу складають дослідження в напрямку розробки ОВ з багатьма серцевинами (Multi-core Fiber, MCF) [1, 10, 11]. Використання такого ОВ дозволяє реалізувати принцип просторового мультиплексування ВОСП під час незначного збільшення діаметра оболонки. Характерно, що у теоретичних і практичних дослідженнях приймають участь фахівці відомого виробника ОВ Fujikura (Японія) [12, 13]. Саме цього напрямку стосується дана стаття.

Умовну структуру багатомодового ОВ показано на рис. 1.

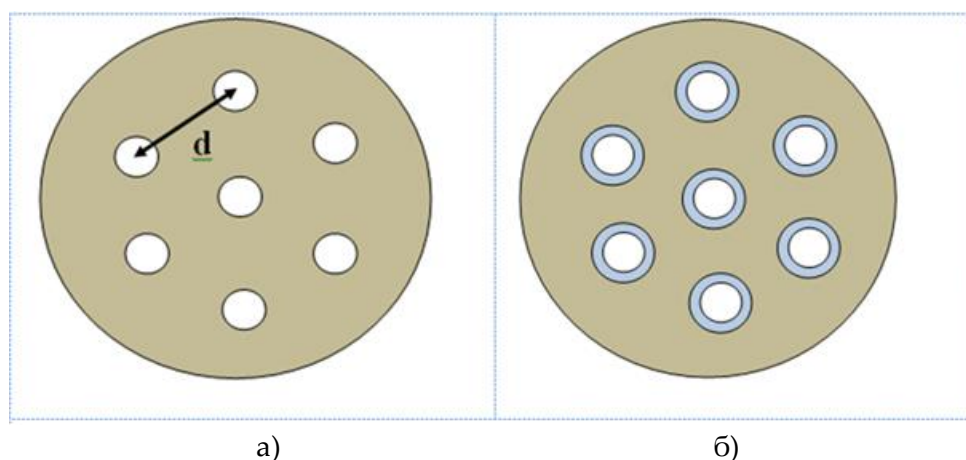


Рис. 1. Структура багатомодового ОВ

У найпростішому вигляді MCF-ОВ складається з двох речовин: речовини серцевин з коефіцієнтом заломлення (КЗ) n_1 та речовини оболонки з КЗ n_2 , $n_2 < n_1$ (рис. 1 а). При цьому відносний КЗ

$$\delta n_{1,2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1)$$

має типові значення для сучасних ОВ – порядку 0,03 [6]. При таких (досить малих) значеннях відносного КЗ умови повного відбиття порушуються за умови малих вигинів ОВ. Тому пропонуються так звані «ямкові» структури (рис. 1 б), де серцевини мають додаткову тонку оболонку з КЗ n_3 таким, що $\delta n_{1,3} \gg \delta n_{1,2}$.

Дослідження [10-13], що згадані вище, стосуються технологічних аспектів виробки MCF-ОВ, вибору варіантів складу серцевин та оболонок і мають на меті забезпечення мінімального рівня інтерференції між серцевинами [14]. Зрозуміло, що вибір оптимальних значень характерної відстані між серцевинами (параметр d на рис. 1) потребує врахування двох суперечливих вимог: мінімізації діаметру ОВ і мінімізації

рівня інтерференції. Саме тому окрему групу складають дослідження метрологічних аспектів взаємного впливу сигналів у MCF-OB [15].

Відомі методики розрахунків геометричних та оптичних параметрів MCF-OB засновуються на досить глибокому теоретичному матеріалі та призводять до використання складних для інженерного аналізу залежностей. Це ані в якій мірі не знижує цінність таких досліджень. Втім, корисними можуть бути також методи експрес-аналізу явищ, які дозволяють мати якісну картину у термінах «більше-менше», «впливає-не впливає» тощо. Такі методи, інакше звані «інженерними», дозволяють отримувати хоча і приблизні, але наочні оцінки основних параметрів об'єктів, що досліджуються

Метою даної роботи є обґрунтування саме такої спрощеної експрес-методики розрахунку геометричних параметрів MCF-OB.

I. Теоретичні основи методики

У подальшому базовим параметром обираємо максимально допустимий рівень інтерференції у сусідніх серцевинах P_{inf} [дБ]. За фізичним сенсом цей параметр можна трактувати як сумарну потужність власних шумів OB за наявності сигналу та шумів компонентів оптичної лінії. Найбільшу складову у значення цього параметру вносять шуми лінійних підсилювачів, тому для спрощеної методики можна обмежитись тільки їх врахуванням з невеликим коефіцієнтом, який враховує інші явища. При цих допущеннях можна обмежитись значеннями допустимої потужності інтерференційних завад у діапазоні від -15 дБ (великий допустимий рівень інтерференції) до -50 дБ (малий допустимий рівень інтерференції) [7]. Такі значення дещо вище типових значень потужності шумів оптичних підсилювачів для різних частот за наявності сигналу.

Параметри типу P_{inf} зазвичай даються у логарифмічній шкалі (дБ). Але для теоретичних досліджень більш зручним може бути представлення тих самих параметрів у лінійній шкалі з очевидним співвідношенням:

$$A = 10^{(P/10)} . \quad (2)$$

Зробимо важливе зауваження. Загалом під потужністю розуміється похідна енергії по часу та/або по довжині лінії. Якщо на стороні прийому здійснюється амплітудне детектування, то для аналізу можна обмежитись амплітудними значеннями потужності. Враховуючи, що типові реєстратори оптичного випромінювання (фоторезистори, фототранзистори та фотодіоди) реагують на щільність світлового потоку [16], то важливими є інтегральні енергетичні параметри. Тобто, серед параметрів інтерференції треба також розглядати величини

$$W(t, z) = \int_{t-\tau}^t P(t, z) dt , \quad P(z) = P_0(t) \exp(-\gamma z) , \quad (3)$$

та відповідно до залежності (2)

$$V(t, z) = \int_{t-\tau}^t A(t, z) dt, \quad (4)$$

де τ – тривалість оптичного імпульсу; z – відстань вздовж лінії; γ – коефіцієнт загасання; $P_0(t)$ – початковий розподіл енергії по часу.

Втім, у практичних умовах можна використовувати більш прості уявлення. Так, типова тривалість оптичних імпульсів у сучасних ВОСП складає 10-1000 пс. За цей час світло з груповою швидкістю для ОВ порядку $2 \cdot 10^8$ м/с розповсюдиться на відстань 0,02 – 2 м. Оскільки типові значення коефіцієнта загасання мають значення 0,1-0,3 дБ/км [3-5], то на таких відстанях загасання можна взагалі знехтувати, тобто надалі вважати потужність постійною по довжині лінії в межах тривалості імпульсу. Також інтегрування по формулі (3) можна виконати за допомогою теореми про середнє, тоді $W(t, z) = \tau \cdot P_{av}$, де P_{av} – середня за часом потужність оптичного імпульсу. Аналогічно можна виконати інтегрування за формулою (4). Оскільки у подальшому всі енергетичні величини будуть відрізнятися лише коефіцієнтами, то в межах даної роботи будемо ототожнювати енергію та потужність, розуміючи, що вони все ж таки мають різні одиниці виміру.

Для аналізу явищ у багатомодовому ОВ можна застосувати найпростіший варіант теорії – геометричну оптику [3]. Для одномодових ОВ доводиться використовувати більш складні моделі – уявлення світла як електромагнітного явища. Основу теорії в такому випадку складають рівняння Максвелла [4]. Водночас, якщо розглядати лише енергетичні залежності, то можна обмежитись використанням поняття модової плями, тобто розподілу енергії у поперечному розрізі ОВ [3]. У цьому випадку розподіл енергії зазвичай моделюється гаусовим законом, а ефективний діаметр модової плями вважається приблизно постійним вздовж усієї довжини лінії [6]. Характерно, що навіть під час практичних досліджень у напрямку підвищення просторової когерентності випромінювання міцних промислових лазерів [17] розподіл енергії у модовій плямі також моделюється гаусовою функцією. Тому розподіл енергії $v(x, \alpha)$ у модовій плямі в полярних координатах будемо вважати гаусовим у радіальному напрямку x та рівномірним за кутом α . Також будемо використовувати нормоване до одиниці сумарне значення енергії сигналу (потужність 0 дБ), тоді:

$$v(x, \alpha) = \frac{1}{2\pi\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad V = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx d\alpha = 1, \quad (5)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення (СКВ).

Доля енергії, яка витікає з серцевини в напрямку обмеженого кута α , відповідно до формул (5) буде визначатись:

$$V_{out}(\alpha) = \frac{\alpha}{2\pi} \int_0^\alpha \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma^2}} dx d\alpha = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right], \quad (6)$$

де erf – узагальнена функція («інтеграл похибок»).

Оскільки діаметр оболонки суттєво більший, аніж діаметр серцевини r (рис. 1), то для оцінок взаємного впливу як для багатомодового, так і для одномодового режимів досить точні результати дає геометрична оптика. Тому кут α за формулою (6) можна визначити із геометричних міркувань (рис. 2).

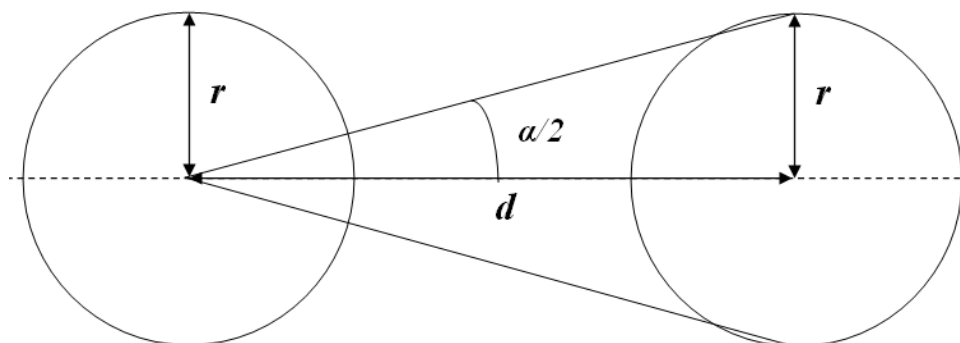


Рис. 2. До визначення ефективного кута взаємного впливу

Вважається, що потужність випромінювання в оболонці експоненційно спадає залежно від відстані [3]. Втім, якщо матеріал оболонки також є кварцовим склом з невеликим відсотком домішок [6], то коефіцієнт загасання, як відмічено вище, складає 0,1-0,3 дБ/км. Тоді загасанням при типових діаметрах оболонки 100-200 мкм можна взагалі знехтувати. Тобто на відстані d між центрами серцевин ефективний кут взаємного впливу буде визначатись за виразом:

$$\alpha = 2 \cdot \operatorname{arctg}(r/d) \Rightarrow d = r \cdot \operatorname{ctg}(\alpha/2). \quad (7)$$

У формулі (6) зручно ввести масштабний множник v_0 , який чисельно дорівнює долі інтегралу по змінній x :

$$v_0 = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \Rightarrow V_{out}(\alpha) = \frac{\alpha}{2\pi} v_0. \quad (8)$$

Враховуючи формули та припущення (2) – (4), визначимо допустимий рівень потужності шумів як $A_{inf} = 10^{(P_{inf}/10)}$. Вочевидь, характерна відстань d між сусідніми серцевинами повинна бути такою, щоб виконувалась нерівність: $V_{out}(\alpha) \leq A_{inf}$. Тоді із залежностей (7) і (8) витікає, що мінімальна відстань d буде виражатися простою формулою:

$$d = r \cdot \operatorname{ctg}(\pi \cdot A_{inf} / v_0). \quad (9)$$

Як бачимо, отримано досить простий вираз для розрахунку мінімальної відстані між парою серцевин. Оскільки функція ctg є монотонно спадаючою, то формула (9) дозволяє виконувати, як мінімум, якісний аналіз. Вочевидь, з цієї формули витікає, що у разі зменшення допустимого значення взаємного впливу, що характеризується параметром A_{inf} , характерну відстань d між серцевинами треба збільшувати. Навпаки, якщо доля енергії, що витікає у серцевину зменшується, то можна зменшувати і відстань між серцевинами. Тобто формула (9) не суперечить інтуїтивним уявленням.

Втім, модель лише двох серцевин (рис. 2) не враховує впливу з багатьох серцевин. Так, відповідно до рис. 1 найбільшому впливу буде піддаватися центральна серцевина. Сумарний вплив на дану серцевину можна оцінити, таким чином, величиною $6 \cdot A_{\text{inf}}$.

Надалі будемо розглядати дві можливі топології МСФ-ОВ: триангуляційну структуру (ТС) і прямокутну структуру (ПС). Серцевини ТС розміщуються на рівних відстанях у вершинах рівносторонніх трикутників (рис. 1). У ПС основу топології складає квадрат зі стороною $2d$, а центральна серцевина знаходиться у центрі такого квадрату. Водночас найближчими сусідами центральної серцевини є 4 серцевини на відстані d та ще 4 серцевини на відстані $d\sqrt{2}$.

Загалом вплив багатьох сусідніх серцевин на центральну серцевину можна оцінити величиною $A_{\Sigma} = k(N, T)A_{\text{inf}}$, де коефіцієнт $k(N, T)$ залежить від кількості серцевин N та топології їх розміщення T навколо центральної серцевини. Як зазначено вище, $k(6, \text{ТС}) = 6$. Для ПС величину сумарного впливу найближчих серцевин можна отримати за точним виразом:

$$A_{\Sigma} = 4 \frac{\alpha}{2\pi} v_0 + 4 \frac{\alpha^*}{2\pi} v_0, \quad (10)$$

де кут α визначається за виразом (7), а кут $\alpha^* = 2 \cdot \operatorname{arctg}(r / d\sqrt{2})$. Таке уточнення потребує вирішення трансцендентних рівнянь числовими методами. Але якщо вважати кути α та α^* досить малими, то в даному випадку можна оцінити коефіцієнт $k(8, \text{ПС}) \approx 4 + 2\sqrt{2} \approx 6,41$.

Вплив серцевин, що знаходяться на більшій відстані, оцінити за допомогою простих та абсолютно точних виразів неможливо. Втім, вважаючи, що цей вплив приблизно є зворотно пропорційним до відстані між ними і те, що напрямки розповсюдження перекриваються повністю або частково проміжними серцевинами, можна використовувати досить прості міркування. Визначено коефіцієнт $k(N, T, M) = K(M) \cdot k(N, T)$, де M – кількість умовних шарів серцевин, що мають відстань від центральної серцевини $d, 2d, \dots, Md$. В лінійному наближенні з урахуванням проміжних втрат енергії коефіцієнт $K(M)$ можна оцінити величиною

$$K(M) = \sum_{m=1}^M \frac{1}{m}. \quad (11)$$

За досить значної варіації значень параметру M (від 1 до 10) коефіцієнт (11) приймає значення від 1 до приблизно 3. Для моделі MCF-OB з двома оболонками (рис. 1 б) за умови, якщо в середовищі оболонки з коефіцієнтом заломлення n_2 спостерігається значне загасання, можна обмежитись випадком найближчого впливу, коли $K(M) = 1$. Для інших випадків при розгляданні багатошарових структур експрес-аналіз можна виконувати при проміжному значенні $K(M) \approx 2$.

Тоді розрахункова формула для визначення характерної відстані між серцевинами матиме вигляд:

$$d = r \cdot \text{ctg}(\pi \cdot k(N, T, M) \cdot A_{\text{inf}} / v_0), \quad (12)$$

де коефіцієнт $k(N, T, M)$ має такі значення: 6 та 6,41 для моделі впливу найближчих серцевин для ТС і ПС відповідно; 12 і 12,82 для багатошарової моделі для ТС і ПС відповідно.

II. Алгоритмічне та програмне забезпечення методики

Для застосування формули (12) зручно ввести додатковий коефіцієнт ρ – нормований радіус – відношення радіусу серцевини до СКВ σ у формулах (5)-(8): $\rho = r / \sigma \Rightarrow \sigma = r / \rho$. Значення параметрів витікання енергії для типових значень цього коефіцієнта наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Значення параметрів витікання енергії в залежності від нормованого радіуса

	ρ					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
v_0	1,3614E-01	4,6497E-02	1,2680E-02	2,6952E-03	3,8855E-04	2,6769E-06
V_0 , дБ	-0,8788	-5,5442	-11,1874	-17,9126	-26,3241	-47,9422

Алгоритм визначення геометричних параметрів MCF-OB складається із наступних послідовних кроків.

Крок перший: визначення (завдання) вхідних параметрів. Задаються параметри: r – радіус серцевини, ρ – нормований радіус, R – радіус оболонки, P_{inf} – допустимий рівень шумів (взаємного впливу) в дБ. Також визначається тип структури – ТС або ПС і варіант врахування впливу багатьох серцевин – тільки найближчого шару або багатьох шарів.

Крок другий: розрахунок характерної відстані d . Визначаються значення параметрів:

- за формулою (2) визначається значення параметру допустимого рівня шумів A_{inf} у лінійному масштабі;
- залежно від заданої структури визначається коефіцієнт $k(N, T, M)$;
- за формулою (8) визначається значення параметра v_0 ;

- за формулою (12) отримується значення мінімально допустимої відстані між серцевинами d_{\min} ;

- остаточно визначається характерна відстань між серцевинами: $d = d_{\min}$, якщо $d_{\min} \geq 3 \cdot r$, або $d = 3 \cdot r$, якщо $d_{\min} < 3 \cdot r$. Дане правило потребує, щоб найближчі точки сусідніх серцевин були на відстані не менше, ніж радіус серцевини.

Крок третій: розрахунок вихідних параметрів і наочне відображення геометричної структури MCF-ОВ. На даному кроці:

- визначається половина кількості горизонтальних рядків (по осі x за рис. 3) $K_x = \lceil R/d \rceil + 1$, яка є однаковою для ТС і ПС;

- визначається вертикальна відстань h між рядками: $h = d$ для ПС та $h = d\sqrt{3}/2$ для ТС;

- визначається половина кількості вертикальних рядків: $M_y = \lceil R/h \rceil + 1$;

- призначаються координати центральної серцевини x_0, y_0 ;

- відображається центральна серцевина та присвоюється початкове значення лічильнику кількості серцевин $N = 1$;

- у подвійному циклі від $m = 1$ до $m = M_y$ по вертикалі та від $k = 1$ до $k = K_x$ по горизонталі розраховуються координати $x_{\pm k}, y_{\pm m}$ реальних або фантомних серцевин: $y_{\pm m} = y_0 \pm m \cdot h$, та $x_{\pm k} = k \cdot d$ для ПС і парних рядків ТС, та $x_{\pm k} = k \cdot d + 0,5 \cdot d$ для непарних рядків ТС;

- у даному циклі для кожної пари координат перевіряється умова потрапляння всередину оболонки: $(x_{\pm k} - x_0)^2 + (y_{\pm m} - y_0)^2 \leq (R - r)^2$. Якщо нерівність виконується, то серцевина відноситься до класу реальних і відображається, а лічильник кількості серцевин інкрементується: $N := N + 1$. У протилежному випадку серцевина відноситься до класу фантомних і не відображається, а також не змінюється значення лічильника кількості серцевин.

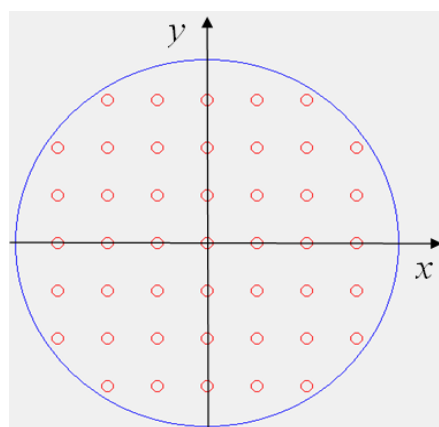


Рис. 3. До визначення параметрів геометричної структури MCF-ОВ

Даний алгоритм реалізовано авторською програмою Fiber Structure (мова програмування C#), вікно якої показано на рис. 4.

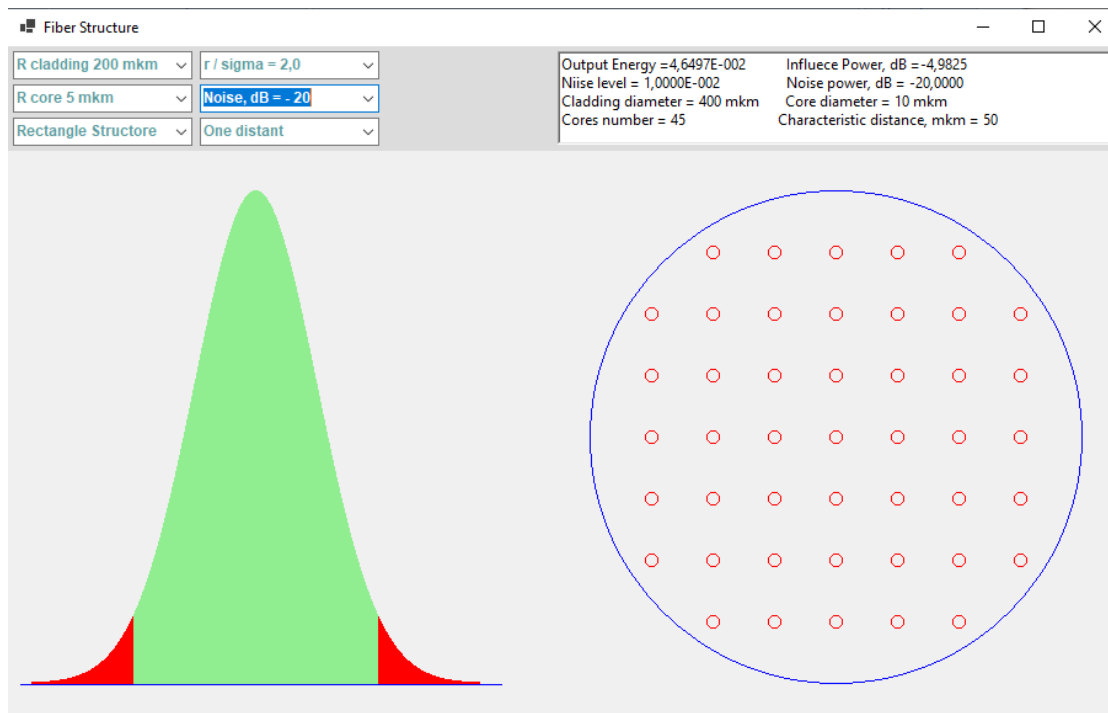


Рис. 4. Вікно програми Fiber Structure

У верхній панелі вікна розміщуються компоненти вибору варіанта розрахунків (ліворуч) і вікно відображення результатів (праворуч). У нижній панелі відображається гаусова функція з наочною демонстрацією частки енергії, яка виходитиме із серцевини в оболонку та результат розрахунку структури MCF-OB у графічному вигляді в масштабі: 1 мкм в одному пікселі.

Компоненти вибору варіанта дозволяють обрати:

- радіус оболонки від 50 до 200 мкм з кроком 50 мкм;
- радіус серцевини від 3 до 6 мкм з кроком 1 мкм;
- відносний радіус серцевини від 1,5 до 4,0 з кроком 0,5;
- рівень шумів (допустимий рівень впливу на центральну серцевину) від – 15 до -50 дБ з кроком -5 дБ;
- варіант структури: ТС або ПС;
- варіант урахування багатьох сусідів: тільки найближчих, або вплив багатьох шарів.

Взагалі, програма Fiber Structure дозволяє розрахувати 3072 різні структури. Деякі варіанти розрахованих структур наведені на рис. 5.

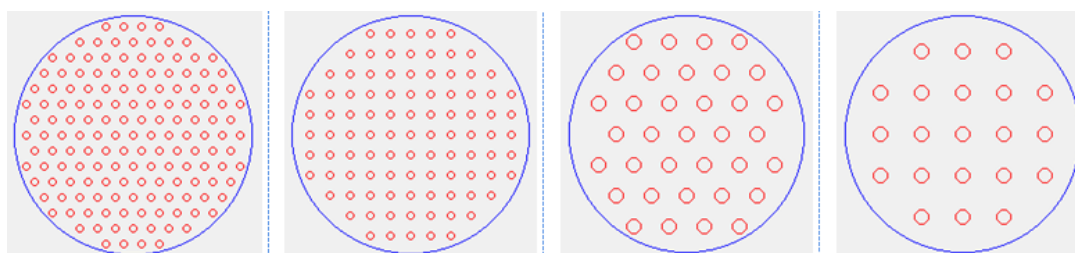


Рис. 5. Варіанти геометричної структури MCF-OB

III. Результати розрахунків геометричних параметрів MCF-OB

Частково результати розрахунків для мінімального радіуса серцевини 3 мкм і максимального радіуса серцевини 6 мкм приведено у табл. 2 та 3. В усіх цих таблицях враховується тільки вплив найближчих серцевин, радіус оболонки дорівнює 200 мкм, а відносний радіус серцевини має значення 3,0.

Таблиця 2. Залежність мінімальної відстані d між серцевинами для $r = 3$ мкм та $r = 6$ мкм від допустимого рівня впливу $k(N, T, M) \cdot A_{inf}$ на центральну серцевину

$d(r)$, мкм	$k(N, T, M) \cdot A_{inf}$, дБ							
	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
$d(r = 3)$, ТС	9	9	9	15	49	154	488	1544
$d(r = 3)$, ПС	9	9	9	17	56	176	556	1757
$d(r = 6)$, ТС	18	18	18	30	98	309	977	3088
$d(r = 6)$, ПС	18	18	18	35	111	351	1111	3515

Таблиця 3. Залежність кількості реальних серцевин N для $r = 3$ мкм та $r = 6$ мкм від допустимого рівня впливу $k(N, T, M) \cdot A_{inf}$ на центральну серцевину

N	$k(N, T, M) \cdot A_{inf}$, дБ							
	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
$d(r = 3)$, ТС	1661	1661	1661	613	59	7	1	1
$d(r = 3)$, ПС	1485	1485	1485	421	37	5	1	1
$d(r = 6)$, ТС	397	397	397	151	13	1	1	1
$d(r = 6)$, ПС	357	357	357	97	9	1	1	1

Аналіз даних у табл. 2 та 3 дозволяє зробити висновки:

- мінімальна відстань між серцевинами приблизно лінійно залежить від радіусу серцевин;
- найбільший вплив як на параметр мінімальної відстані між серцевинами, так і на кількість реальних серцевин має значення параметра допустимого рівня шумів;
- за рівних умов структура ТС дає більшу щільність кількості серцевин на одиницю площі оболонки, ніж структура ПС;
- у разі досить малих допустимих рівнів шумів мінімальна відстань між серцевинами перевищує радіус оболонки, тобто втрачається сама ідея MCF-OB.

Оскільки найбільш суттєвим фактором для визначення геометричної структури MCF-OB є співвідношення між часткою енергії, що витікає із серцевин в оболонку та допустимим рівнем шумів, то доцільно провести аналіз залежностей основних параметрів структури від цього фактора. Частка витікаючої енергії залежить від структури модової плями, що є функцією відносного радіуса серцевини ρ (табл. 1). Один із варіантів розрахунків залежності мінімальної відстані між серцевинами залежно від допустимого рівня впливу на центральну серцевину та від відносного радіуса дано у табл. 4.

При цьому взяті значення радіуса оболонки 200 мкм і радіуса серцевин 5 мкм. Розрахунки виконано лише для структури ТС.

Таблиця 4. Залежність мінімальної відстані d між серцевинами для $r = 5$ мкм від допустимого рівня впливу $k(N, T, M) \cdot A_{\text{inf}}$ та відносного радіуса ρ

ρ	$k(N, T, M) \cdot A_{\text{inf}}, \text{дБ}$							
	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
1,5	41	130	411	1300	4111	13000	41110	130000
2,0	15	44	140	444	1404	4440	14041	44402
2,5	15	15	38	121	388	1211	3829	12108
3,0	15	15	15	25	81	257	814	2574
3,5	15	15	15	15	15	37	117	371
4,0	15	15	15	15	15	15	15	15

Дані табл. 4 дозволяють визначити досить просту залежність мінімальної відстані між серцевинами від зміни відносного радіусу та допустимого рівня впливу: збільшення відносного радіусу на 0,5 приблизно еквівалентно зменшенню допустимого рівня впливу на $-5q$ дБ, де коефіцієнт q має значення в межах приблизно від 1 до 4. Також видно, що при досить малих допустимих рівнях впливу (від -40 до -50 дБ) МСФ-ОВ можна реалізувати лише при досить малих рівнях витікаючої енергії, що у прийнятій моделі характеризується значеннями відносного радіуса більше 3,5.

IV. Аналіз стійкості та коректності алгоритмів методики

У даному розділі розглянемо критерій придатності пропонованої методики приблизно у такій парадигмі [18]: «Якщо невеликі зміни початкових умов вирішення задачі призводять до суттєвих змін кінцевих результатів, то застосовувана теорія не має ніякого практичного сенсу». Тобто, будемо вирішувати задачу стійкості результатів до малих відхилень від прийнятих допущень.

Тому уточнимо, що пропонована методика відповідає ідеальній практичній ситуації:

- на деякій відстані від чергового лінійного підсилювача корисний сигнал має міцність 0 дБ;
- не враховано ефекти поляризації, що відрізняється від кругової.
- загасання в оболонці немає;
- серцевини мають форму ідеального кола;
- відрізок ОВ на цій відстані ідеально прямий;
- не врахована залежність результатів від довжини хвилі випромінювання.

Як показують розрахунки, відхилення потужності корисного сигналу на ± 1 дБ не призводить до суттєвої зміни результатів. Великі відхилення ± 5 дБ враховуються самою методикою, якщо у формулах (5) ввести відмінний от одиниці амплітудний коефіцієнт. Втім, з урахуванням широкої сітки значень шумів (від -15 до -50 дБ) ту ж саму

операцію можна виконати із застосуванням запропонованої методики і переносом сітки значень допустимих рівнів шуму у діапазон від -15 ± 5 дБ до -50 ± 5 дБ.

Поляризаційні ефекти також досить просто враховуються, якщо розглядати енергію максимальної складової електричного поля.

Загасання в оболонці в даному випадку буде мати лише позитивний вплив на результати. Втім, якщо загасання суттєве, то для розрахунку впливу найближчих сусідів розрахункові формули незначно змінюються за рахунок певного коефіцієнта загасання. При цьому мінімальна допустима відстань між сердцевинами буде лише зменшуватись, а впливом дальніх сусідів можна взагалі знехтувати.

Відхилення форми сердцевин від кругової враховуються у формулі (12), якщо як параметр r взяти найбільший поперечний розмір сердцевини. При цьому невеликі відхилення форми сердцевини від кругової призводять до таких самих невеликих відхилень значення допустимої відстані, оскільки параметри r та d зв'язані лінійною залежністю.

Окрему задачу складає аналіз залежності рішень від вигинів ОВ. Як видно із рис. 6, максимальний кут падіння можна виразити за формулою:

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{R_c - 2 \cdot r}{R_c}\right) = \arcsin(1 - 2\delta R_c), \quad \delta R = r / R_c, \quad (13)$$

де R_c – радіус вигину ОВ; δR – параметр відносного радіуса вигину.

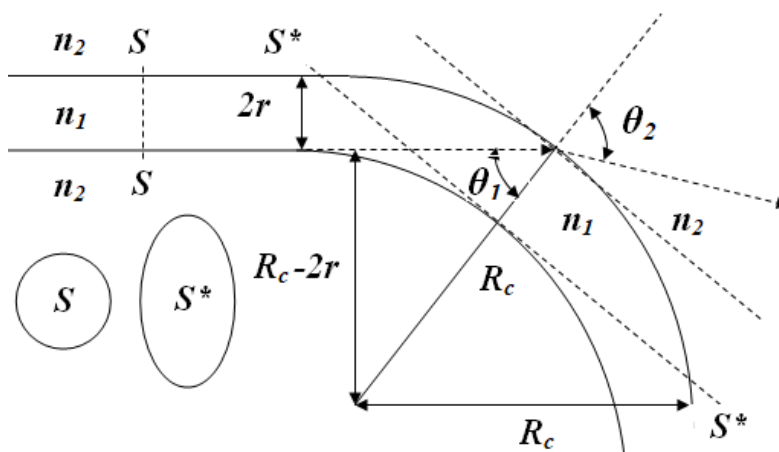


Рис. 6. До розрахунку кута падіння на вигині ОВ

Кут повного відбиття (критичний кут падіння) за законом Снеліуса визначається з урахуванням формули (1):

$$\theta_{cr} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \arcsin(1 - \delta n). \quad (14)$$

Порівнюючи вирази (13) та (14) бачимо, що повне відбиття буде спостерігатися, якщо $2\delta R_c < \delta n$ або $R_c > 2 \cdot r / \delta n$. Враховуючи типові значення δn приблизно 0,03, можна визначити, що критичний кут падіння має значення приблизно 1,325 рад, або $75,93^\circ$. Для багатомодового ОВ з характерним радіусом серцевини 60 мкм критичний радіус вигину буде мати значення близько 4 мм. Для одномодового ОВ такий радіус буде ще менший – до 0,4 мм. Зазвичай вигини оптичного кабелю виконуються з радіусом не менше 50 см, а вигини ОВ на лотках оптичних муфт навряд чи мають значення менше 1 см. Тому для багатомодового режиму корекція методики не потрібна.

В одномодовому режимі врахуємо, що площина падіння на вигині ОВ має вже не форму кола (розріз $S-S$ на рис. 6), а форму, близьку до еліпса (розріз S^*-S^* на рис. 6). Тому у площині вигину ОВ та у близьких до неї площинах також можуть спостерігатись багатоходові явища. Тобто, висновки, що зроблено вище, залишаються незмінними. Принципово оцінити відносну кількість витікаючої на вигині енергії можна за допомогою відомих формул Френеля. Втім, якщо кут падіння $\theta_1 \approx \theta_{cr}$, а відносний коефіцієнт заломлення малий (у нашому випадку $\delta n \approx 0,03$; відповідно, $\theta_1 \approx \theta_2$ на рис. 6), то пряме застосування таких формул дає навіть парадоксальні результати аж до порушення закону зберігання енергії. Причина в тому, що складові електромагнітного поля навіть при критичних і позакритичних кутах падіння мають певні значення і в оболонці, але при цьому не відбувається передача енергії із серцевини в оболонку [19]. Як показують розрахунки, формули Френеля дають адекватні результати у випадках, коли кути падіння менше критичного. Втім, у цьому випадку радіус вигину має бути ще менший, ніж визначено вище. Тому обмежимося отриманими вище оцінками критичного радіуса вигину ОВ, який вже й так на порядок менший, ніж у реальних умовах.

У попередніх розрахунках використовувались значення КЗ серцевин і оболонки. Ці параметри залежать від довжини хвилі випромінювання λ . Графіки залежності КЗ від довжини для типових матеріалів ОВ [20, 21] наведені на рис. 7.

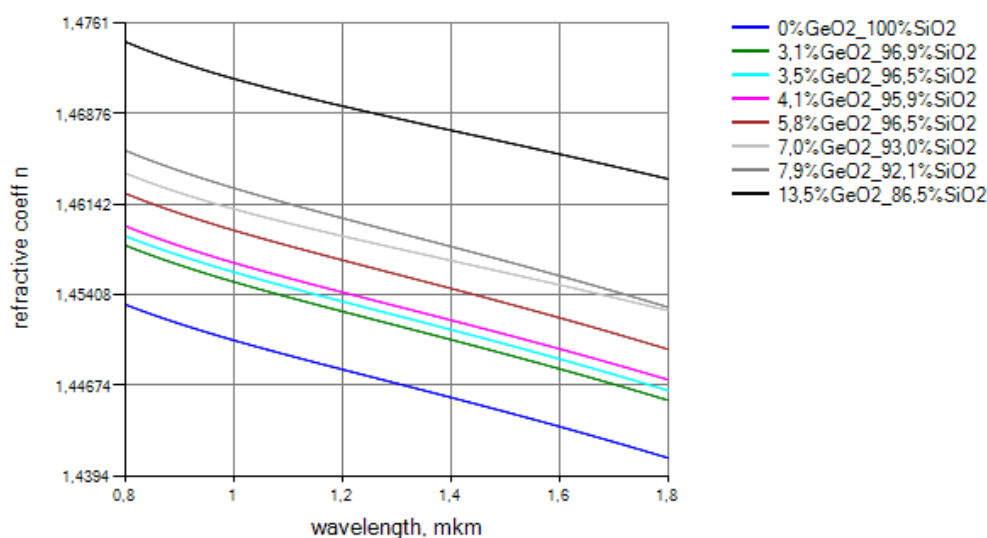


Рис. 7. Залежність значень КЗ від довжини хвилі та хімічного складу речовини ОВ

Аналіз графіків на рис. 7 показує, що у досить широкому спектрі залежності КЗ для двох різних речовин можна отримувати перенесенням графіку у напрямку вісі ординат.

Тоді: $n_1(\lambda) - n_2(\lambda) \approx \text{const}(\lambda) = \Delta n$. При цьому у досить широкому спектрі значення КЗ, як витікає з рис. 7, можна апроксимувати лінійною функцією:

$$n(\lambda) = n(\lambda = 0,8) - p(\lambda - 0,8),$$

де коефіцієнт $p \leq 0,02$. З цього нескладно визначити, що у досить широкій смузі довжини хвиль відносний КЗ у формулі (14) може змінюватись лише незначно – у межах 2%. Тобто, у розрахунках мінімального радіусу вигину ОВ залежністю КЗ від довжини хвилі можна знехтувати.

Коректність теорій може бути перевірена лише реальними вимірюваннями. Тому порівнюємо отримані результати з відомими практичними дослідженнями. Так, у роботі [10] розглядається МСФ-ОВ з 7-ма серцевинами, аналогічно структурі на рис. 1. При цьому досить складні теоретичні висновки відносно впливу периферійних і центральної серцевини порівнюються з результатами прямих вимірювань. З цієї роботи витікає, що для різних варіантів взаємна інтерференція оцінюються величиною приблизно від -30 до -40 дБ. Порівнюючи з даними табл. 1-4 бачимо, що приблизно такі ж значення отримуються і за пропонованої методики. Інші дані наведено у статті [12], де для різних варіантів розглядаються рівні взаємного впливу від -20 до -50 дБ. Кількість серцевин при цьому 7 або 19, а діаметр оболонки від 160 до 240 мкм. Таким чином, пропонована методика не суперечить відомим результатам вимірювань і більш складним теоріям розрахунку геометричних параметрів МСФ-ОВ.

Висновки

1. Пропонована методика дозволяє з прийнятною точністю виконувати експрес-аналіз геометричних параметрів МСФ-ОВ і дозволяє вирішувати дві задачі: пряму і зворотну. Вирішення прямої задачі дозволяє приблизно оцінити геометричні параметри структури МСФ-ОВ. Вирішення зворотної задачі дає оцінки допустимого рівня шумів у лінії, виходячи з геометричних параметрів МСФ-ОВ.

2. Методика основана на аналізі співвідношень між допустимим рівнем взаємного впливу між серцевинами та рівнів витикання енергії із серцевин в оболонку. Тому вона стійка до широкої варіації параметрів цих явищ. Енергетичний підхід дозволяє, таким чином, суттєво спростити розрахункові формули.

3. Результати стійкі до малих відхилень геометричних параметрів МСФ-ОВ: до відмінності форми серцевин від кола, а також до вигинів ОВ, що характерні при монтажі ліній ВОСП.

4. Отримані чисельні результати не суперечать відомим результатам, що отримані шляхом безпосередніх вимірювань та шляхом застосування більш складних теорій.

5. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення дозволяє вирішувати задачу розрахунку геометричних параметрів МСФ-ОВ у разі дуже широкої варіації типових значень вхідних параметрів.

Список літератури

1. Дмитриева, С.А., Слепова, Н.Н. (2010), Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы, М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 608 с.
2. Фокин, В.Г., Ибрагимов, Р.З. (2017), Оптические системы с терабитными и петабитными скоростями передачи, Новосибирск: ФГБОУ ВПО «СибГУТИ», 180 с.
3. Снайдер, А., Лав, Дж. (1987), Теория оптических волноводов, Радио и связь, 657 с.
4. Бейли, Д., Райт, Э. (2006), Волоконная оптика: теория и практика: Пер. с англ., КУДИЦ-ОБРАЗ, 320 с.
5. Гауэр, Дж. (1989), Оптические системы связи: Пер. с англ., Радио и связь, 504 с.
6. Agrawal, G. P. (2019), Nonlinear Fiber Optics, Elsevier Inc., 728 p.
DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01168-8>
7. Макаров, Т.В. (2009), Когерентные волоконно-оптические системы передачи, Одеса: ОНАС им. А.С. Попова, 220 с.
8. Staschuk, O.M., Stepanov, D.M., Bahachuk, D.H. (2020), "Polarization mode dispersion compensator based on anisotropic optical fiber", Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, No. 1, P. 12-18. DOI: <https://doi.org/10.33243/2518-7139-2020-1-1-12-18>
9. Бондаренко, О.В., Манько, О.О., Стащук, О.М., Степанов, Д.М., Багачук, Д.Г. (2013), "Компенсація дисперсії сигналу за допомогою оптичного волокна з анізотропними властивостями", Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», No. 4, С. 43-49.
10. Matsuo, S., Takenaga, K., Arakawa, Y., Sasaki, Y., Tanigawa, S., Saitoh, K., Koshihara, M. (2011), "Crosstalk behavior of cores in multi-core fiber under bent condition", IEICE Electronics Express, No. 8(6), P. 385-390. DOI: <https://doi.org/10.1587/elex.8.385>.
11. Sakamoto, T., Mori, T., Wada, M., Yamamoto, T., Yamamoto, F., Nakajima, K. (2017), "Strongly-coupled multi-core fiber and its optical characteristics for MIMO transmission systems", Optical Fiber Technology, No. 35, P. 8-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2016.07.010>.
12. Фуджимаки, М. (2014), "Передовые технологии оптического волокна: от ультрадлинной магистрали до домашней проводки", Волоконно-оптические технологии, Первая миля, No. 3, С. 56-61.
13. Takenaga, K., Arakawa, Y., Tanigawa, S., Guan, N., Matsuo, S., Saitoh, K., Koshihara, M. (2011), "An investigation on crosstalk in multi-core fibers by introducing random fluctuation along longitudinal direction", IEICE transactions on communications, No. 94(2), P. 409-416. DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.E94.B.409>.
14. Wang, L., Li, S., Li, J., Meng, X., Guo, Y., Li, Z., Wang, X., Wang, Y. (2021), "Superposition-assisted 125- μm cladding multi-core fibers with ultra-low inter-core crosstalk and high relative core multiplicity factor", Optical Fiber Technology, Volume 67: 102721, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102721>.
15. He, Q., Pei, L., Ning, T., Zheng, J., Li, J., Wang, J. (2021), "A novel contour feature denoising method for real geometrical parameters measurement of multi-core fiber", Optical Fiber Technology, No. 63, p.102499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102499>

16. Анисимова, И.Д., Викулин, И.М., Заитов, Ф.А., Курмашев, Ш.Д. (1984), Полупроводниковые фотоприемники: ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны спектра, Радио и связь, 216 с.

17. Schaumberger, K., Mann, V., Mödl, M., Hofmann, K., Stein, S., Roth, S., Schmidt, M. (2018), "Influence of focal spot diameter and beam oscillation on the process efficiency of laser beam welding utilizing a direct diode laser", Procedia CIRP, No. 74, P. 466-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.149>

18. Решетняк, Ю.Г. (1982), Теоремы устойчивости в геометрии и анализе, Сиб. отд. изд-ва Наука, 228 с.

19. Борн, М., Вольф, Э. (1973), Основы оптики, Наука, 716 с.

20. Одегов, Н.А., Грушенко, А.А., Костюк, В.В., Резник, Р.С. (2018), "Методика синтеза моделей зависимостей дисперсионных характеристик от частоты и состава оптического волокна", Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, No. 1, С. 68-76. DOI: <https://doi.org/10.33243/2518-7139-2018-1-1-68-76>.

21. Одегов М.А., Глущенко, І.О., Дурідівка, В.О. (2020), "Феноменологічні моделі основних характеристик ступеневого оптичного волокна", Проблеми телекомунікацій, No. 1(26), С. 33-47. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2020.1.03>.