

продукції, логотипів компаній, та інш.



Рис. 4. Зразки друкованих моделей

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Kossel – RepRapWiki [Електронний ресурс]; режим доступу (<http://reprap.org/wiki/Kossel>), дата використання [02.10.2018].
- [2] Delta geometry [Електронний ресурс]; режим доступу (https://reprap.org/wiki/Delta_geometry) ; дата використання [02.10.2018].
- [3] Использование станочного алюминиевого профиля [Електронний ресурс]; режим доступу (<http://www.rsi-llc.ru/>); дата використання [02.10.2018].

Підвищення ефективності роботи оптоволоконних ліній зв'язку в умовах впливу зовнішніх факторів оточуючого середовища

Борис Малик¹, Олена Токарева², Світлана Малик-Заморій³

1. Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, пр. Науки. 14, УКРАЇНА, e-mail: borys.malyk@nure.ua.
2. Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, пр. Науки. 14, УКРАЇНА, e-mail: olena.tokarieva@nure.ua.
3. Кафедра Фізики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, пр. Науки. 14, УКРАЇНА, e-mail: svitlana.malyk-zamorii@nure.ua.

Анотація: Розглянута задача і обґрунтовані шляхи підвищення ефективності роботи оптичних волокон в умовах впливу зовнішніх факторів оточуючого середовища. Пропонується технічна реалізація вдосконаленого технологічного процесу, яка дає можливість використання оптоелектронних ліній передачі інформації в складних умовах.

Ключові слова: оптичне волокно; параметри випромінювача; втрати потужності; ефективність сполучення.

І. ВСТУП

Для збереження працездатності оптоволоконних ліній передачі при високих рівнях затухання потужності електромагнітної хвилі під впливом зовнішніх факторів оточуючого середовища (радіоактивності, деформацій, зміни температури та інше) необхідно компенсувати втрати шляхом

підвищення потужності генераторів, чутливості приймачів, підвищення ефективності вводу випромінювання високопотужних джерел в оптичне волокно, особливо одномодове, збільшення відношення сигнал/завада.

Послідовно оптимізація масогабаритних і економічних характеристик лінії зв'язку складається з розрахунку параметрів випромінювачів, приймачів, ефективності введення випромінювання у волокно і звичайно вибором типів волокон [1].

II. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Для визначення параметрів напівпровідникових випромінювачів необхідно розрахувати [2]:

– внутрішню квантову ефективність:

$$\eta_{вн} = \left(1 + \frac{2\tau_{вип}}{\tau_{б/вип}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де $\tau_{вип}$, $\tau_{б/вип}$ – час випромінюючої та безвипромінюючої рекомбінації;

– зовнішню квантову ефективність:

$$\eta_{зовн} = \frac{n_e}{n_i}, \quad (2)$$

де n_e – кількість емітованих квантів;

n_i – кількість інжектованих квантів.

Апертурний коефіцієнт пов'язує обидві квантові ефективності та визначає долю випромінювання, що виводиться на зовні:

$$F = \frac{\eta_{зовн}}{\eta_{вн}}, \quad (3)$$

Диференційна квантова ефективність:

$$\eta_D = \frac{dP}{dI_n}, \quad (4)$$

де P – потужність випромінювання;

I_n – струм накачки.

Втрати потужності при генерації випромінювання обумовлено:

– повним внутрішнім відбиттям на межі напівпровідник – навколишнє середовище, якщо випромінювання падає під кутом більшим, ніж критичний.

– френелівським відбиттям для променів, що падають під кутом меншим, ніж критичний;

– поглинанням променів у об'ємі напівпровідника і в приконттактних областях.

Вони визначаються за формулою [3]:

$$K_{втр} = \left(\frac{n_n - n_{сер}}{n_n + n_{сер}} \right)^2 \approx 30\%, \quad (5)$$

де $n_{сер}$ – показник заломлення середовища,

n_n – показник заломлення напівпровідника.

Чутливість фотоприймача S характеризує реакцію ФП на дію потоку випромінювання певної величини.

При розрахунках необхідно використовувати:

– вольтову чутливість:

$$S_v = U_\phi / P_{випр}, \quad (6)$$

де U_ϕ – фотонапруга;

$P_{випр}$ – потужність введенного випромінювання;

– струмову чутливість:

$$S_i = I_\phi / P_{випр}, \quad (7)$$

де I_ϕ – фотострум.

Критерієм чутливості може бути величина квантового виходу, яка визначається відношенням кількості генерованих світлом електронно-діркових пар до кількості фотонів, які влучили до фотоприймача [4]:

$$\eta = \frac{(I_\phi / e)}{(P_{випр} / h \cdot \nu)}, \quad (8)$$

де I_ϕ – фотострум;

e – заряд електрона;

$P_{випр}$ – потужність випромінювання.

Тоді струмова чутливість:

$$S_i = \eta \cdot e / h \cdot \nu = \eta \cdot \lambda / 1,24. \quad (9)$$

Коефіцієнт збирання носіїв $K_{зб}$ обумовлює ту частину генерованих світлом носіїв, яка розділяється полем р-п – переходу та створює фотострум. Може статися, що частина носіїв рекомбінує, не встигаючи дійти до р-п-переходу.

Постійна часу ФП τ – інтервал часу після закінчення опромінення в кінці якого напруга сигналу, що спадає по експоненті, зменшується, від початку опромінення до моменту, коли величина вихідного сигналу досягає 63% свого максимального рівня.

Від параметра τ залежить гранична частота $F_{гр}$ – частота синусоїдально модульованого потоку випромінювання, що падає на ФП, при якому його чутливість знижується до значення 0,707 порівняно з чутливістю при немодульованому випромінюванні [3].

Пороговий потік (поріг чутливості) $\Phi_{пор}$ визначає можливість реєстрації гранично малих оптичних сигналів та пов'язаний з шумами ФП.

Шуми можуть бути [2]:

– зовнішні: різного роду оптичні наводки, яких легко запобігти;

– внутрішні: обумовлені випадковими процесами, тому описуються такими параметрами, як математичне очікування або дисперсія середнього рівня шумів.

Основні види шумів необхідно враховувати при розрахунках:

– тепловий шум, який виникає під дією хаотичного теплового руху вільних електронів та не залежить від величини корисного сигналу і характеризується рівномірним шумом у смузі частот Δf , тобто так званий «білий шум». Дисперсія напруги теплового шуму на опорі навантаження (вхідному опорі підсилювача). Основний метод боротьби з ним – охолодження ФП;

γ - дробовий – обумовлений тим, що струм на виході ФП є потоком дискретних частинок, кількість яких флюктує в часі;

– надлишковий шум ($1/f$ - шум) слабо залежить від температури, має перевагу в області низьких частот. Обумовлений різними неоднорідностями у об'ємі та на поверхні напівпровідника, недосконалістю омичних контактів;

– радіаційний (фотонний) шум виникає внаслідок флуктуації кількості фотонів випромінювача та фону і характеризується рівномірним спектром. Зовнішній радіаційний шум обумовлений:

а) при $\lambda > 4\text{мкм}$ (основний вид завад) – тепловим випромінюванням атмосфери та земної поверхні (мах на довжині хвилі 10мкм);

б) при $\lambda < 3\text{мкм}$ – фонові завади від сонячного випромінювання.

Загальні параметри фотоприймачів у ВОСПІ які слід враховувати :

- співвідношення сигнал/шум у децибелах;
- рівень шумів у нВт;
- чутливість фотодетектора;
- шумовий струм;

– середнеоквадратичне значення теплового шуму, середньоквадратичне значення дробного шуму, заряд електрона, постійна Больцмана, абсолютна температура, середня сила струму (включно фоновий струм та струм сигналу), смуга частот, опір навантаження.

При вводити випромінювання в волокно необхідно враховувати:

- обмеження поверхневого припустимого кута $\theta_{кр}$ внутрішнім поверхневим відбиттям;
- Френелівське відбиття від межі розподілу повітря напівпровідник;

– поглинанням поміж точкою генерації випромінювання та випромінюючою поверхнею: фотон з енергією, більшою за ширину забороненої зони E_g може збудити електрон у зону провідності, при цьому фотон самопоглинається. Отже, відстань до поверхні має бути скорочена. Однак біля поверхні багато вільних «пасткових» рівнів, які змінюють безвипромінювальний час життя та знижують внутрішню квантову ефективність.

Світловий потік визначається інтегруванням потужності, що випромінюється в одиницю тілесного кута в напрямку під кутом θ до нормалі до його поверхні $I = I_0 \cos \theta$ [3]:

$$\Phi_0 = \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_0 \cos \theta \cdot 2\pi \cdot \sin \theta d\theta = \pi I_0. \quad (10)$$

Частина світлового потоку джерела випромінювання, що потрапляє в оптичне волокно обмежена числовою апертурою волокна та визначається інтегралом:

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_0^{\varphi_{кр}} I_0 \cos \theta \cdot 2\pi \cdot \sin \theta d\theta = \\ &= \pi I_0 \sin^2 \varphi_{кр} = \Phi_0 \cdot NA^2, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\varphi_{кр}$ – апертурний кут волокна.

Отже, ефективність вводу у волокно дорівнює [2]:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = NA^2. \quad (12)$$

Коефіцієнт ефективності виводу випромінювання з джерела з урахуванням критичного кута θ_c .

Світловий потік випромінювання в одиничному кути у напрямку θ відносно нормалі до поверхні:

$$\Phi_0 = 2 \int_{\theta=0}^{\pi/2} I_0 \cos \theta \cdot 2\pi \cdot \sin \theta d\theta = 2\pi I_0. \quad (13)$$

Доля загальної потужності, обмежена кутом θ_c :

$$\begin{aligned} f &= \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{1}{2\pi I_0} \int_0^{\theta_c} I_0 \cos \theta \cdot 2\pi \cdot \sin \theta d\theta = \\ &= \frac{1}{2} \sin^2 \theta_c = \frac{n_0^2}{2n^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

При малих $\theta < \theta_c$ за рахунок Френелівського відбиття частина енергії R відбивається, отже при перпендикулярному падінні проходить частина t , якщо $n_0 = 1$ [3]:

$$t = 1 - R = 4n_0 n / (n_0 + n)^2 = 4n / (1 + n)^2. \quad (15)$$

При більш похилих променях частина енергії що випромінюється, змінюється мало і дорівнює нулю, якщо $\theta_c = 0$.

Цей коефіцієнт може бути збільшений за рахунок просвітлення, при цьому ідеальне значення дорівнює $(n_0 n)^{1/2}$, коли t прямує до 1.

Загальний коефіцієнт має вираз:

$$f \cdot t = 2/n(1+n)^2 = 0,24. \quad (16)$$

Отже, ефективність виводу випромінювання за межі кристала джерела $\eta_{зовн}$ визначається як зовнішня квантова ефективність:

$$\eta_{зовн} = \eta_{внутр} \cdot f \cdot t, \quad (17)$$

а ефективність вводу у волокно:

$$\eta_{вол} = \eta_{зовн} \cdot NA^2.$$

Загальна потужність, яка генерується в джерелі випромінювання:

$$\Phi_{внутр} = \eta_{зовн} \cdot \frac{I}{e} \cdot E_{фотона}. \quad (18)$$

Оптична потужність, яка випромінюється у повітря:

$$\Phi_{пов} = \eta_{зовн} \cdot \frac{I}{e} \cdot E_{фотона}, \quad (19)$$

де $\eta_{зовн} = \eta_{внутр} \cdot f \cdot t$.

Потужність, яка потрапляє в оптичне волокно:

$$\Phi_{вол} = \eta_{вол} \cdot \frac{I}{e} \cdot E_{фотона}, \quad (20)$$

де $\eta_{вол} = \eta_{зовн} \cdot NA^2$.

III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ

При реалізації оптоволоконних ліній зв'язку часто виникає завдання узгодження оптоелектронних компонентів і волокон з різними поперечними перетинами випромінюючої і

приймаючої області та різними числовими апертурами. Варіантом такого завдання може бути з'єднання одномодового і багатомодового волокон або випромінювачів і фотоприймачів з волокнами різних типів.

Наприклад, при використанні лазерного діода для передачі великої потужності через одномодове волокно необхідне узгодження полів, що генеруються діодом і виникають в пов'язаному з ним одномодовому волокні. Доводиться погоджувати параметри електромагнітних коливань і, отже, геометричних параметрів елементів. Тільки в такому випадку, навіть в умовах великих втрат пропускної здатності при суттєвих впливах оточуючого середовища, волоконно-оптична система збереже свою працездатність [5].

Одним з варіантів системи для узгодження полів можуть бути так звані каскадні волокна, в яких приймальне волокно спеціальної форми і ділянки градієнтних багатомодових волокон (БВ) інтегровані в одномодове волокно (ОВ) (рис.1) [7].

При виготовленні узгоджуючої секції у вигляді клиноподібного багатомодового оптичного волокна послідовно зрощуюють два відрізки багатомодових градієнтних оптичних світловодів (БВ1 та БВ2) і одномодового волоконного світловоду.

Така узгоджуюча секція перетворює еліптичний профіль випромінювання в круговий, а розмір модового поля на виході другого багатомодового градієнтного оптичного волокна БВ2 дорівнює розміру модового поля необхідного для ефективного збудження одномодового світловоду.

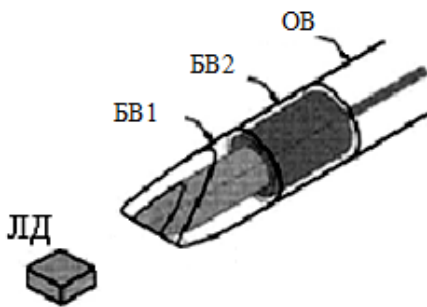


Рис.1. Каскадне волокно, що містить клиноподібний наконечник + БВ1 + БВ2 + ОВ

Приведені в роботі [5] теоретичні викладки і експериментальні дані говорять про те, що можна спроектувати таку послідовну структуру з БВ1, БВ2 і ОВ, яка забезпечить ефективну передачу енергії від випромінювача в одномодове волокно.

Технічні помилки під час виготовлення таких секцій тягнуть за собою додаткові втрати і погіршення сполучних характеристик, так як кожна БВ область має свою визначену функцію, таку як фазове перетворення, перетворення розміру, перетворення профілю.

Тому геометричні розміри кожної ділянки

пристрою узгодження потрібно контролювати з точністю до 1 мікрометра. Це дозволить зменшити додаткові втрати зв'язку різних компонентів до прийнятних величин.

Для спостереження сполучної площини, при виготовленні узгоджуючої секції, використовується непрямий інтерферометричний метод, який на відміну від дифракційних та голографічних методів, є найбільш точним, простим в реалізації, а його недоліки в порівнянні з іншими методами представляються несуттєвими. Для оцінки місця розташування сполучної площини спостереження проводяться під мікроскопом зі збільшенням 360X. Однак відстань між волокном і об'єктивом в мікроскопах з високою роздільною здатністю дуже мала.

У виробництві каскадного волокна, процедура сколювання вимагає великого простору, в якому відстань між волокном і лінзою пристрою контролю повинна бути більше ніж 4 см. Отже, метод визначення положення сполучної площини з великою робочою відстанню (> 40 мм) і з малим збільшенням (<8X) контрольної системи є ключем до поліпшення процесу виготовлення каскадних волокон [7].

Грунтуючись на проведених дослідженнях інтерференційних методів та методів квантування і дискретизації були отримані зображення, які характеризуються оригінальними темними лініями, що покриті інтерференційними смугами. У таких зображеннях можна спостерігати відмінності між інтерференційними смугами в багатомодових і одномодових волокнах. Інтенсивності і кількість інтерференційних смуг в цих двох секціях волокна будуть різними, що дозволяє визначити місце розташування сполучної площини.

Опрацюючи інформацію в зображеннях, елемент з'єднання двох волокон знаходиться за допомогою цих смуг. Так як на кількість інтерференційних смуг впливають розміри волокна, інтенсивність світла та положення фокальної площини, узгодження цих трьох факторів необхідне для отримання задовільного зображення. Щоб знайти оперативну інформацію про БВ і ОВ ділянках, застосовується програмна і апаратна обробка зображень. Для роботи реальної системи контролю різниця між зображеннями повинна бути досить великою (рис.2) [8].



Рис.2. Результат контролю

Цієї інформації достатньо для програми контролю відмінностей на двох ділянках волокна. Програма визначає відмінності між ОВ і БВ ділянками.

Для поліпшення сполучних характеристик і враховуючи технологічні особливості виготовлення компонентів розроблено нові методи контролю геометричних параметрів різних ділянок волокон що з'єднуються, які забезпечать можливість вільного доступу інструменту в робочу зону [9]. В даний час втрати в з'єднанні можна знизити до 0,03 дБ.

IV. ВИСНОВКИ

Було обґрунтовано доцільність використання методу підвищення ефективності вводу випромінювання потужних джерел в оптичні волокна в умовах дії інтенсивних впливів навколишнього середовища. Запропонована технічна реалізація вдосконаленого технологічного процесу робить можливим використання оптоелектронних ліній передачі інформації в складних умовах.

Визначення точності розташування сполучної площини в пристроях узгодження з похибкою близько одного мікрметра підвищує ефективність вводу випромінювання до 20 дБ. Це, в свою чергу, дасть змогу зберегти працездатність волоконно-оптичної системи, з довжиною і рівнем впливу навколишнього середовища, прийнятними для військового, наукового та космічного призначення. Наприклад, якщо розглянути систему, в якій відношення потужності, що генерується передавачем, до мінімально допустимої потужності на вході приймача становить 50 дБ, то навіть при згасанні на 100 дБ/км, до якого приведе доза іонізуючого випромінювання в 1000 рад, дозволить забезпечити роботу лінії з довжиною близько кілометра.

- [1] О.К. Склярів *Волоконно-оптические сети и системы связи*. Солон-пресс, 2010.
- [2] Янг М. *Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы*. Мир, 2005.
- [3] А.Б. Иванов *Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения*. Сайрус системс, 1999.
- [4] Стерлинг Д. Дж. (мл.) *Волоконная оптика. Техническое руководство*. Лори, 2001.
- [5] H. Yoda, T. Endo, and K. Shiraishi "Cascaded GI-fiber chips with a wedge-shaped end for the coupling between an SMF and a high-power LD with large astigmatism," in *J. Lightw. Technol.*, vol. 20, no. 8, 2002, pp. 1545–1548.
- [6] Филипенко А. И., Малик Б. А., Селенкова Н. П. и Гончар В.В.: "Контроль геометрических параметров каскадных оптоволоконных структур" *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, №3/5(57), 2012, с.28–31.
- [7] Спосіб виготовлення узгоджуючої секції оптичних волокон: Патент України № UA 115811 U, опубл. 25.04.2017, бюл. № 8 / Малик Б.О., Малик – Заморій С.Б.
- [8] Malyk, B. O., Tokarieva, O. V., & Malyk-Zamorii, S. B. (2018). Optical fiber structures performance enhancement under the conditions of ionizing radiation high power levels. *Problems of Atomic Science and Technology*, 114(2), 13-18.
- [9] Патент України №122687 Спосіб виготовлення узгоджуючої секції оптичних волокон, 2018.

Оптимізація режимів нанесення фоторезисту

Віктор Письменецький, Олександр Профатіло, Владислав Райков

Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА,
Харків, пр. Науки. 14, email: vladyslav.raikov@nure.ua

Анотація: В даному матеріалі було проведено двофакторний дисперсійний аналіз нанесення фоторезисту та дослідження його властивостей.

Ключові слова: фоторезист, оптимізація, дисперсійний аналіз.

I. ВСТУП

Завдання оптимізації зводиться до знаходження таких умов проведення технологічного процесу, при

яких критерій оптимізації (вихідний параметр) досягає екстремуму. Функцію $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_k)$, зв'язує критерій оптимізації з вхідними параметрами, прийнято називати функцією відгуку, а геометричне зображення функції відгуку в факторному просторі - поверхнею відгуку.

При пошуку екстремальної точки, на відміну від аналітичного дослідження, здійснюється локальне вивчення поверхні відгуку за результатами