

Харлай Л.О., Кунах Н.І., Манько О.О., Скубак О.М., Нікіфоренко К.Б.

Одеська національна академія зв'язку ім.О.С.Попова

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК З МЕТОЮ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ

Метод вимірювання показника заломлення циліндричних заготовок з метою управління технологічним процесом виробництва волоконних світловодів. Запропоновано метод визначення показника заломлення для заготовки серцевини оптичного волокна з використанням принципів явища розсіювання світла. Процес вимірювання полягає у визначенні індикатриси розсіяння для заготовки серцевини волокна. Показано, що індикатриси розсіювання однозначно визначає величину показника заломлення, а застосування принципів розсіювання помітно розширює діапазон вимірювань.

Ключові слова: *волоконно-оптичний зв'язок, показник заломлення, волокно, мережа доступу, транспортна мережа, вимірювання.*

Kharlay L.A., Kunakh N.I., Manko A.A., Skubak A.N., Nikiforenko K.B.

Odessa National A.S. Popov Academy of Telecommunications

METHOD FOR MEASURING THE REFRACTIVE INDEX OF CYLINDRICAL BILLETS IN ORDER TO CONTROL THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF OPTICAL FIBERS

The method of measuring the refractive index of cylindrical blanks in order to control the technology of production of optical fibers. A method is proposed for determining the refractive index for the preparation of the core of an optical fiber using the principles of the phenomenon of light scattering. Moreover, the main existing methods for measuring the refractive index are: methods for directly measuring the angle of refraction of light when it passes the interface between two media, methods based on the phenomenon of total internal reflection, as well as interference methods.

Thus, to ensure the control of the technological process for the production of optical fiber in the early stages, it is necessary to use the method of measuring its optical parameters taking into account the above remarks. For this purpose, a method based on the phenomenon of light scattering was proposed in the work. When developing the method, the principles of quantum electrodynamics were used, according to which the luminous flux directed to the object under study is a set of discrete formations - light quantum. The light reflection coefficient at the interface of two optical media in this case represents the probability of reflection of a quantum from the interface. The scattering indicatrix obtained as a result of the scattering process for an object with a specific geometry and refractive index value uniquely determines the refractive index of the object under study.

The results of a study of the scattering phenomenon using an example of an optical cylindrical element showed the possibility of determining the refractive index of a specimen for the production of optical fiber.

Keywords: *fiber-optic communication, refractive index, fiber, access network, transport network, measurements.*

Харлай Л.А., Кунах Н.И., Манько А.А., Скубак А.Н., Никифорова К.Б.

*Одесская национальная академия связи им. О.С.Попова***МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ЦЕЛЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ**

Предложен метод определения показателя преломления для заготовки сердцевины оптического волокна с использованием принципов явления рассеяния света. Процесс измерения заключается в определении индикатрисы рассеяния для заготовки сердцевины волокна. Показано, что индикатриса рассеяния однозначно определяет значение показателя преломления, а применение принципов рассеяния заметно расширяет диапазон измерений.

Ключевые слова: *волоконно-оптическая связь, показатель преломления, волокно, сеть доступа, транспортная сеть, измерения.*

Вступ. Волоконно-оптичний зв'язок є в даний час галуззю, яка найшвидше розвивається. Основою для нього є оптичне волокно, здатне забезпечити інформаційно-пропускну здатність, що перевищує десятки терабайт в секунду. Волокно є направляючою системою для сучасних транспортних мереж і мереж доступу, і для задоволення потреб в них, обсяги виробництва постійно зростають. Процес виготовлення волоконного світловода є складним технологічним процесом, що вимагає використання високоточного устаткування. Волоконні світловоди зазвичай виготовляються в ході ряду технологічних операцій, що вимагають постійного контролю параметрів для забезпечення їх стабільності і повторюваності [1]. Стандартна послідовність технологічного процесу виробництва одномодових оптичних волокон складається з наступних етапів: виготовлення заготовки сердцевины оптичного волокна, нарощування оболонки, витяг заготовки у волокно [2]. Основним конструктивним елементом оптичного волокна є його сердцевина. Параметри заготовки сердцевины визначають якість і експлуатаційні характеристики волокна [2]. При цьому показники заломлення сердцевины волоконного світловода визначаються показниками заломлення його заготівки. Високий рівень стабільності показника заломлення в процесі виробництва оптичного волокна визначається високими вимогами до рівня втрат на стиках оптичних волокон, які у свою чергу визначаються різницею числових апертур і показників заломлення сердцевины волокон, які з'єднуються.

Таким чином, для забезпечення заданих параметрів оптичного волокна в ході технологічного процесу необхідно встановити значення показника заломлення заготовки сердцевины.

Визначення показника заломлення сердцевины оптичного волокна з використанням принципів явища розсіяння

Основними методами виміру показника заломлення або рефрактометрії є: методи прямого виміру кутів заломлення світла при проходженні ним кордонів розділу двох середовищ; методи, засновані на явищі повного внутрішнього віддзеркалення; інтерференційні методи [3].

Для виміру по куту заломлення зразку з досліджуваного матеріалу надають форму призми з деяким заломлюючим кутом α . При використанні для виміру показника заломлення явища повного внутрішнього віддзеркалення зразок вимірюваного матеріалу приводиться в оптичний контакт з еталонною призмою з матеріалу з високим і заздалегідь відомим показником заломлення.

У інтерференційних методах використовуються дві кювети однакової довжини, заповнені речовинами з різними показниками заломлення. Ці методи застосовуються, як правило, при вимірах показника заломлення газів і розбавлених розчинів.

Виміри по першому методу вимагають втрат заготівки в масі і витрат на проведення

обробки матеріалу. Виміри по другому методу також вимагають втрат заготовки в масі і витрат на проведення обробки матеріалу. Третій метод практично непридатний в технологічному процесі зважаючи на необхідність проведення вимірів параметрів твердотілої заготовки.

Крім того, існуючі рефрактометри дозволяють визначати значення показника заломлення в порівняно невеликому діапазоні величин – від 1,4 до 2,1 (для простих конструкцій) і від 1,2 до 2,8 (за наявності ряду змінних блоків) [4]. В той же час створюється новий вигляд синтетичних матеріалів (у тому числі фотонні кристали), показники заломлення яких можуть виходити за межі виміру існуючих приладів. Таким чином, для забезпечення контролю технологічного процесу виробництва оптичного волокна на ранніх етапах, необхідне використання методу виміру його оптичних параметрів з врахуванням наведених вище зауважень.

З цією метою в роботі був запропонований метод, заснований на явищі розсіяння світла [3]. При розробці методу використовувалися принципи квантової електродинаміки, відповідно до яких світловим потоком, що направляється на досліджуваній об'єкт, є набір дискретних утворень, – світлових квантів. Коефіцієнт віддзеркалення світла на кордоні розділу двох оптичних середовищ при цьому є вірогідністю віддзеркалення кванта від кордону розділу [5]. Індикатриса розсіяння, отримана в результаті процесу розсіяння для об'єкту з конкретною геометрією і значенням показника заломлення, однозначно визначає показник заломлення досліджуваного об'єкту. Таким об'єктом в роботі був оптичний циліндричний елемент, який моделював заготовку серцевини оптичного волокна, що має циліндричну форму. Як правило, для заготовок серцевини оптичних волокон виконується співвідношення: $D \gg \lambda$, де D - діаметр заготовки, а λ - довжина хвилі. Таким чином, моделювання розсіяння світла проводилося відповідно до законів геометричної оптики. У такому наближенні поведінка світла, що падає на оптичний елемент, повністю описується законом Снелліуса і формулами Френеля [6,9]. Дифракційні явища в цьому випадку не враховувалися. Передбачалося також, що показник заломлення зберігає постійне значення в межах заготовки, що відповідає серцевині із ступінчастим профілем показника заломлення. В якості вхідного потоку був розглянутий некогерентний потік поляризованого світла у вигляді паралельних променів, що падають на бічну поверхню циліндра. Вектор електричного поля світлових квантів вважався паралельним осі циліндра. В цьому випадку коефіцієнт відображення на межі розділу двох середовищ описується вираженням, отриманим відповідно до [6]:

$$C_R = \frac{n_1^2 \cos 2\theta - 2n_1^2 \cos \theta \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta} + n_2^2}{n_1^2 \cos 2\theta + 2n_1^2 \cos \theta \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta} + n_2^2}, \quad (1)$$

де n_1 і n_2 - показники заломлення повітря і скла відповідно, θ - кут падіння. При цьому сам процес розрахування за допомогою методу Монте-Карло [7]. В процесі розрахунку визначалася траєкторія руху кожного кванта в циліндричному елементі (рис.1) до виходу його за межі елемента і фіксації напрямку виходу з метою побудови індикатриса розсіяння. Упродовж поширення кванта в межах елемента в кожній точці перетину траєкторії з циліндричної поверхні, що утворює, визначався подальший напрям руху - відображення або проходження через поверхню.

Втрати в матеріалі оптичного циліндра вважалися нехтує малими, так що ефект поглинання квантів не враховувався. При цьому фіксувалося значення кута розсіяння кванта по відношенню до напрямку потоку, що входить.

За допомогою вказаного методу були проведені розрахунки індикатриса розсіяння при різних значеннях показника заломлення оптичного елемента. Зокрема були проведені

розрахунки індикатриси розсіяння в околиці значення показника заломлення, рівного 1,46, як такого, що характеризує кварцеве скло.

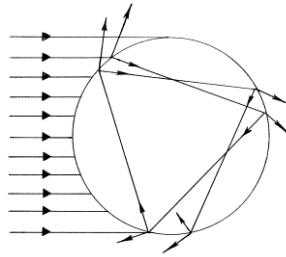


Рис.1. Можливі траєкторії руху оптичного кванта в циліндричному оптичному елементі

На рис.2 зображена індикатриса розсіяння оптичного циліндричного елементу з показником заломлення $n = 1,458$. Напрямок вхідних променів співпадає з напрямом осі x . Як видно з індикатриси, їй властиві чотири піки інтенсивності розсіяння, розташоване симетрично відносно осі x під кутом $\varphi_1 = \pm 100^\circ$ і під кутом $\varphi_2 = \pm 155^\circ$. Нормовані значення інтенсивності цих піків складають 0,62 і 1,0 відповідно.

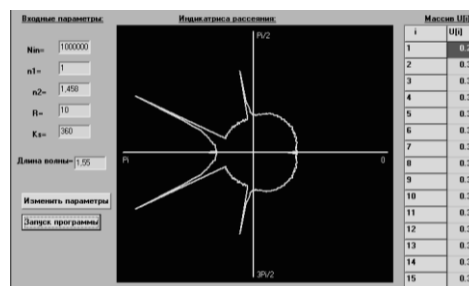


Рис.2. Індикатриса розсіяння циліндричного елементу з кварцевого скла

При зменшенні показника заломлення кут φ_1 збільшувався, а кут φ_2 відповідно зменшувався. Таким чином, цим параметрам виявилися властиві кутові дисперсійні характеристики по відношенню до показника заломлення n . Ці характеристики відбиває величина похідної, яка складає для першого піку - 3,49 радіан, а для другого - 1,745 радіан, тобто в два рази менше. Чисельно ці величини відбивають кутове (у радіанах) зміщення піку, при зміні показника заломлення на одиницю і визначають чутливість методу по зміні показника заломлення n .

Отримані результати свідчать про можливість визначення показника заломлення оптичного циліндричного елементу згідно з видом його індикатриси розсіяння і кутовим положенням піків індикатриси.

При зменшенні показника заломлення до величини 1,33 (значення показника заломлення для води) перший і другий піки переміщуються і займають кутові положення 129° і 139° відповідно (рис.3), що співпадає з даними, отриманими іншими авторами [8] при використанні інших методів розрахунку. Це кути, під якими в дощових краплях можна спостерігати першу і другу веселку [8]. Цей факт підтверджує правильність запропонованого методу.

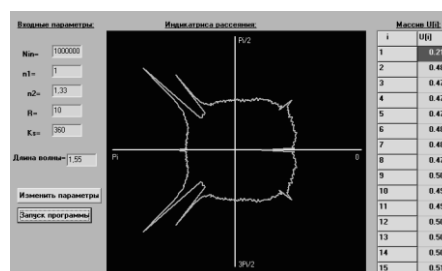


Рис.3. Індикатриса розсіяння циліндричного елементу при значенні показника заломлення, рівного показнику заломлення води ($n_2 = 1,33$)

З метою перевірки результатів моделювання циліндричного оптичного елемента, виконаного з кварцевого скла (SiO_2), було проведено експериментальне дослідження індикатриси розсіяння кварцевого стержня циліндричної форми. Структурна схема виміру на рис. 4.

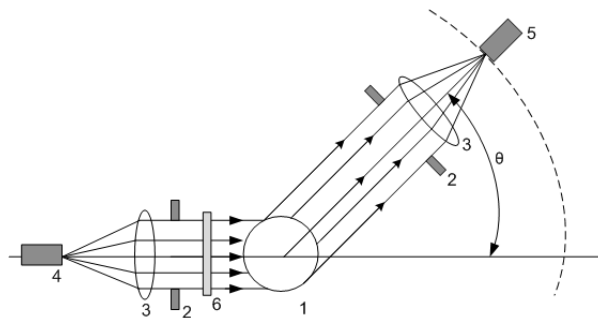


Рис.4. Структурна схема установки для дослідження індикатриси розсіяння
1 - оптичний елемент; 2 - діафрагма; 3 - лінза; 4 - джерело випромінювання; 5 - фотоприймач; 6 - поляризатор

В якості вимірювального приладу був використаний оптичний тестер, що містить джерело випромінювання і фотоприймач. Випромінювання з джерела подавалося на коліматор, а потім через поляризатор паралельний пучок світла поступав до оптичного елемента. Розсіяне світло через фокусуючий елемент поступало на вхід фотоприймача. Результати виміру в межах погрішності вимірювального приладу підтверджують хід індикатриси розсіяння.

Таким чином, результати моделювання процесу розсіяння світла в оптичному циліндричному елементі і експериментальні дані підтверджують можливість визначення показника заломлення серцевини оптоволокна на етапі його виготовлення. Отримані дані можуть бути використані при управлінні технологічним процесом виготовлення оптичного волокна.

Особливості індикатриси розсіяння оптичних циліндричних елементів зі зниженим і підвищеним показником заломлення.

Як було відмічено вище, виміри показника заломлення за допомогою існуючих приладів обмежуються діапазоном значень від 1,2 до 2,8 [4]. В той же час, використання явища розсіяння дозволяє розширити діапазон виміру значень показника заломлення. Так, наприклад, при використанні технології виготовлення фотонних кристалів у волоконній оптиці можна досягти нижчих значень показника заломлення, чим для існуючих типів скла. На рис.5 приведений вид індикатриси розсіяння для випадку, коли показник заломлення оптичного циліндричного елемента складає 1,15.

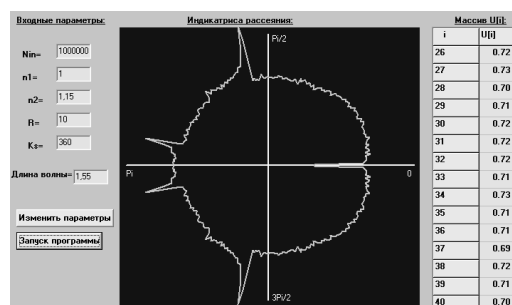


Рис.5. Індикатриси розсіяння при значенні показника заломлення елемента $n_2 = 1,15$

Разом з цим прогрес в розвитку нанотехнологій веде до створення гетерогенних матеріалів з можливістю зміни їх показників заломлення в широкому діапазоні значень. У зв'язку з цим представляє інтерес застосування цього методу для визначення підвищеного значення показника заломлення. На рис.6 приведений вид індикатриси розсіяння для випадку, коли показник заломлення оптичного циліндричного елемента складає 3,3.

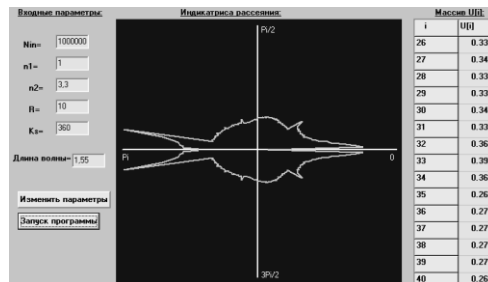


Рис.6. Індикатриса розсіяння при значенні показника заломлення елемента $n_2 = 3,3$

Тут також можна відмітити наявність піків, кутове положення яких в сукупності з видом індикатриси однозначно визначає величину показника заломлення циліндричного зразка.

Висновки

Результати дослідження явища розсіяння на прикладі оптичного циліндричного елемента показали можливість визначення показника заломлення заготівлі для виробництва оптичного волокна. Це дозволяє управляти технологічним процесом його виготовлення, і робити в необхідних випадках корекцію процесу. При цьому вид індикатриси розсіяння дозволяє однозначно визначити значення показника заломлення заготівлі циліндричної форми.

Крім того, виміри, побудовані на принципах явища розсіяння, дозволяють значно розширити діапазон вимірюваних значень показника заломлення при збереженні достатньої точності, визначуваної точністю кутових вимірів. Це особливо актуально для виміру параметрів оптичних волокон і інших пристроїв, створених на базі технології фотонних кристалів і нанотехнологій.

Список використаної літератури

1. Mahlke G., Gossing P. Fiber Optic Cables (Fundamentals, Cable Design, System Planning), 4th edition, 2001, MCD Corporate Publishing.
2. Жиро А. Технологии производства оптических волокон. Обзор последних разработок / А. Жиро // Наука и техника. – 2009. – №4. – С.22-27.
3. Физический энциклопедический словарь / А.М. Прохоров и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 944 с.
4. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. 3-е изд., перераб., Л.: Химия, 1983. – 352 с.
5. Richard P. Feynman, QED – The strange theory of light and matter. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985.
6. M. Born, E. Wolf. Principles of optics. Pergamon Press. Oxford, London, Edinburgh, New York, 1965.
7. Katok V.B. New Method of Quantitative Modelling of Fiber Filters on Thin Films/ V.B. Katok, V.A. Manko, A.A. Manko // Proc. 7th International Conf. on Transparent Optic “ICTON 2005”(July 3-7, 2005). – Barcelona (Spain), 2005. – P.444–446.
8. H.C. van de Hulst. Light scattering by small particles. New York. John Wiley & Sons, Inc. London. Chapman & Hall, Ltd. 1957.

9. Скубак О.М. Деякі питання визначення конструктивних параметрів оптичних кабелів зі стрічковим осердям/ О.М. Скубак, О.О. Манько //Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – №4. – 2011. – С.335-341.

10. Скубак О.М. Надійність оптичних кабелів з оптичними волокнами нових типів / О.М. Скубак, В.В. Онищенко, О.О. Манько, К.О. Ніколов // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – №3. – 2015. – С.43-49.

References

1. Mahlke G., Gossing P. *Fiber Optic Cables (Fundamentals, Cable Design, System Planning)*, 4th edition, MCD Corporate Publishing, 2001. Print.

2. Giro A. “Technologies for the production of optical fibers. Recent Developments Review.” *Science and Technology* 4 (2009): 22-27 Print.

3. A.M. Prokhorov et al. *Physical Encyclopedic Dictionary*. Moscow, Sov. Encyclopedia, 1984. Print.

4. Ioffe B.V. *Refractometric methods of chemistry*. 3rd ed., Revised, Chemistry, 1983. Print.

5. Richard P. Feynman, *QED – The strange theory of light and matter*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985. Print.

6. M. Born, E. Wolf. *Principles of optics*. Pergamon Press. Oxford, London, Edinburgh, New York, 1965. Print.

7. Katok V.B., Manko V.A., Manko A.A. “New Method of Quantitative Modelling of Fiber Filters on Thin Films” *Proc. 7th International Conf. on Transparent Optic “ICTON 2005, Barcelona, Spain* (July 3-7, 2005): 444–446. Print.

8. H.C. van de Hulst. *Light scattering by small particles*. New York. John Wiley & Sons, Inc. London. Chapman & Hall, Ltd. 1957. Print.

9. O.M. Skubak, O.O. Manko. “Some Issues of Determination of Design Parameters of Optical Cables with Tape Core.” *Bulletin of the State University of Information and Communication Technologies* 4 (2011): P.335-341. Print.

10. O.M. Skubak, V.V. Onishchenko, O.O. Manko, and K.O. “Nikolov. Reliability of optical cables with new types of optical fibers.” *Scientific notes of Ukrainian Research Institute of Communications* 3 (2015): 43-49. Print.

Автори статті (Authors of the article)

Харлай Людмила Олексіївна – к.т.н., старший викладач кафедри телекомунікацій (Kharlai Liudmila PhD in Technics , Senior Lecturer in the Department of Telecommunications). Phone:+380 (98) 712 25 97. E-mail: Lharlay@i.ua.

Кунах Наталія Ігорівна – д.т.н., професор кафедри телекомунікацій (Kunakh Nataliia - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Telecommunications). Phone:+380 (67) 777 52 37. E-mail: ignaku@ukr.net.

Манько О.О. – д.т.н., професор кафедри телекомунікацій (Manko Olexandr - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Telecommunications). Phone:+380 (67) 408 67 80. E-mail: manko_kiev@ukr.net.

Скубак Олександр Миколайович – к.т.н., старший викладач (Skubak Olexandr - PhD in Technics, Senior Lecturer in the Department of Telecommunications) Phone:+380 (67) 403 99 90. E-mail: kubakan@ukr.net.

Нікіфоренко Костянтин Борисович – к.т.н., старший викладач кафедри телекомунікацій (Nikiforenko Kostiantyn – PhD in Technics, Senior Lecturer Senior Lecturer in the Department of Telecommunications) Phone:+380 (67) 907 09 35. E-mail: kbnkfrnk@gmail.com.