

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ

DOI: 10.20535/1970.67(1).2024.306720

УДК 681.2.084; 681.2.088

МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ГРАДІЄНТІВ НА ЧУТЛИВІСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА

Кучеренко О. К.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: oleg.k.kucherenko@gmail.com

Термоіндукована похибка є однією з основних обмежень чутливості волоконно-оптичних гіроскопів (ВОГ). Аналіз термочутливості ВОГ ґрунтується на дослідженні ефекту Шупе та пружно-оптичного ефекту у волоконному контурі. Основна вимога, яка водночас ставиться, це збереження принципу взаємності для променів, що розповсюджуються у зустрічних напрямках волоконного контуру. Визначено, що термічно індукована різниця фаз цих променів не повинна перевищувати $\Delta\varphi(t) \approx 10^7$ рад. Для зменшення термочутливості ВОГ використовуються різні методи, серед яких квадрупольні методи намотування волоконного контуру, використання безкаркасних котушок, а також котушок із спеціальних матеріалів. Значна увага приділяється покращенню властивостей волокна і клеючих компаундів для мінімізації впливу температури на оптико-фізичні характеристики цих компонентів волоконного контуру. В статті розглянуті переваги і недоліки кожного з методів компенсації термоіндукованої похибки ВОГ. Приведені аналітичні співвідношення, що характеризують вплив температурних градієнтів на чутливість вимірювання кутової швидкості і фази Саньяка при використанні ВОГ. Частина методів вирішення вказаної проблеми розглянуті в цій статті. Однак постійно вдосконалюються елементна база і засоби обробки сигналу ВОГ, здійснюється перехід на інтегрально-оптичні технології, що відкриває нові шляхи з мінімальними витратами підвищити чутливість ВОГ. На основі проведених досліджень надані практичні рекомендації щодо зменшення впливу температурних градієнтів на чутливість ВОГ. Робота може бути корисною для фахівців, що працюють в галузі проєктування ВОГ.

Ключові слова: волоконно-оптичний гіроскоп (ВОГ); термоіндукована похибка ВОГ; волоконна котушка; ефект Шупе; пружно-оптичний ефект; квадрупольна і спеціальна квадрупольна намотки волокон; клеючий компаунд.

Вступ

Принцип дії, основні характеристики та проблеми проєктування волоконно-оптичного гіроскопа (ВОГ) викладені в роботі [1]. У роботі наголошується на тому, що чутливість ВОГ значно погіршується під впливом градієнтів температури, що діють і на оптико-фізичні характеристики волокна, і на термомеханічні напруги в кільцевому контурі ВОГ. Ці градієнти обумовлені, як нагрівом волокна в середині ВОГ, так і зовнішніми змінами температури. Слід враховувати те, що ці фактори змінюються в часі, особливо при несиметричному температурному збудженні, тому ключовою проблемою при розробці високоточних ВОГ є компенсація похибок, викликаних термоіндукованими дрейфами вимірювання кутової швидкості. Некомпенсований термоіндукований дрейф призводить до порушення основної вимоги до волоконно-оптичного інтерферометра, а саме збереження принципу взаємності.

Термічно індукований невзаємний фазовий зсув у волоконно-оптичному інтерферометрі вперше описав Шупе [2]. За цим прослідували дослідження різних методів намотки волоконного контуру, що забезпечували симетричний розподіл температур відносно середньої точки цього контуру та давали можливість зберегти принцип взаємності [3, 4]. Питанням, пов'язаним зі зменшенням дії термомеханічних напруг, що спричиняють появу пружно-оптичного ефекту внаслідок розтягування, згинання, полімеризації волокна, присвячено роботу [5]. Дослідження показали, що на виникнення напружень у волокні впливають структура волокна, клеючий компаунд для фіксації волокон контуру, матеріал та конструкція котушки. Вплив кожного фактору не є незалежним, тому розрахувати результуючий фазовий зсув складно.

Автори робіт [6, 7, 8], аналізуючи дію пружно-оптичного ефекту в безкаркасній котушці, врахували той факт, що довжина витка волокна збільшується від внутрішнього до зовнішнього шару. Крім того, перший і останній витки кожного

шару створюють осьову асиметрію, що збільшує термоіндуковану похибку. Тобто враховувався не ідеальний, а практичний результат запропонованого методу квадрупольної намотки. Гомогенізована структура середовища волоконного контуру, що складається з осердя волокна, покриттів та клеючої речовини, розбивалася на елементарні ділянки, до яких застосовувався аналіз із використанням методу скінченних елементів (МСЕ). Відношення похибки вимірювання кутової швидкості до температурної похідної було визначено, як коефіцієнт температурної чутливості. Отримані моделюванням результати досліджень зміненої напруги намотування волоконної котушки підтверджувалися експериментальною перевіркою.

Мета статті: узагальнюючи результати досліджень різних авторів, запропонувати дієві та практично реалізовані методи зменшення впливу температурних градієнтів на чутливість ВОГ.

Основні теоретичні положення

Принцип дії ВОГ заснований на використанні ефекту Саньяка. Якщо відносно запізнення зустрічних хвиль, що виникає при обертанні ВОГ з кутовою швидкістю $\Omega(t)$, виразити через різницю фаз зустрічних хвиль $\Delta\varphi(t)$, то вона визначиться співвідношенням [1]:

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi DL}{\lambda c} \Omega(t), \quad (1)$$

де D – діаметр котушки волокна; L – довжина волокна; λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання; c – швидкість розповсюдження електромагнітного випромінювання.

Різниця фаз $\Delta\varphi(t)$ є фазою Саньяка. Як бачимо, фаза Саньяка пропорційна кутовий швидкості обертання контуру. Складова рівняння (1) $\frac{2\pi DL}{\lambda c} = K$ має назву масштабного коефіцієнту ВОГ.

Основною вимогою до ВОГ є збереження принципу взаємності. Фазова невзаємність у ВОГ визначається диференціальною різницею фаз зустрічних променів навіть за відсутності кутової швидкості обертання. Будь-яка фазова невзаємність (різниця фаз) для двох напрямків дає зміни в показаннях гіроскопа. Якщо невзаємність є функцією часу, має місце деякий часовий дрейф у показаннях гіроскопа.

Слід, крім того, відзначити, що сам принцип дії ВОГ заснований на невзаємній властивості поширення зустрічних хвиль у системі відліку, що обертається. Тому безперечно важливість аналізу невзаємних ефектів та пристроїв у ВОГ (щонайменше, хоча б для визначення чутливості приладу). Щоб уявити вимоги до фазової невзаємності слід, наприклад, врахувати, що лише волокно дов-

жиною 500 м дає фазову затримку порядку 10^{-10} рад. Візьмемо типові параметри ВОГ: довжина волокна $L = 500$ м; діаметр котушки $D = 0,2$ м; довжина хвилі випромінювання $\lambda = 10^{-6}$ м; швидкість розповсюдження електромагнітних коливань $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; чутливість визначення кутової швидкості $\Omega(t) = 0,05$ град/год ($2,4 \cdot 10^{-7}$ рад/с). Скориставшись співвідношенням (1), отримаємо, що шляхи розповсюдження протилежно бігучих у волоконному контурі променів повинні узгоджуватись з відносною точністю, що задовольняє вимоги зміни фази $\Delta\varphi(t) \approx 10^{-7}$ рад.

Температурні градієнти створюють суттєвий невзаємний фазовий зсув між хвилями, що зустрічно поширюються у волоконній котушці. Невзаємний фазовий зсув визначався в роботі Шупе [2]. Якщо поєднати його рівняння з рівнянням Саньяка, похибка визначення кутової швидкості $\Omega_s(t)$ для ВОГ може бути записана як [6]:

$$\Omega_s(t) = \frac{n}{LD} \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha \right) \times \int_0^{L/2} [\dot{T}(z,t) - \dot{T}(L-2z)] (L-2z) dz, \quad (2)$$

$$\Omega_s(t) = \frac{n}{LD} \left(\frac{dn}{dT} + n\alpha \right) \int_0^L \dot{T}(z,t) (L-2z) dz, \quad (3)$$

де n – показник заломлення осердя волокна; $\frac{dn}{dT}$ – температурний коефіцієнт показника заломлення волокна; $\dot{T}(z,t)$ – похідна температурного поля за часом; z – координата ділянки волокна, де температура коливається.

В роботі [7] розширено аналіз температурного впливу на пружно-оптичні взаємодії у волоконній котушці. Автори розглянули варіант конструкції котушки, вид зверху якої показаний на рис. 1.

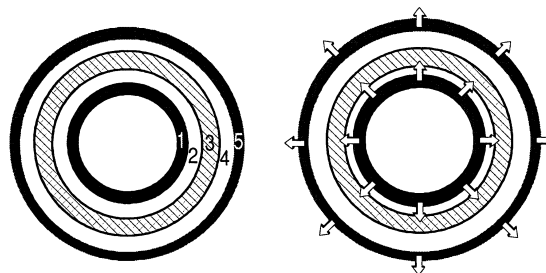


Рис. 1. Вид зверху вузла оптоволоконної котушки з 5 областями: 1 і 5 – алюміній; 2 і 4 – клеючий компаунд (наприклад, силікон); 3 – волокно

Вся збірка складається з 5-шарового розташування з радіальною симетрією. Ліва частина на рис. 1 демонструє стан напружень при кімнатній температурі, а права – після підвищення температури. Маючи на увазі різницю лінійних температурних коефіцієнтів розширення алюмінію

($\alpha_{Al} = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) і кварцового волокна

($\alpha_K = 5.4 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$) можна передбачити, що алюміній в шарах 1 і 5 буде розширюватися, тоді як волокно залишатиметься у відносно сталих розмірах. Це призведе до зменшення внутрішнього проміжного простору заповненого клеючим компаундом 2. Одночасно буде збільшено простір 4. Ці явища будуть прогресувати зі збільшенням температури.

Стиснення волокна у внутрішніх шарах призведе до збільшення його показника заломлення, в той час як в зовнішніх шарах при розширенні шару 5 тиск на волокно і показник заломлення волокна зменшаться.

Зміна полів напружень призводить до похибки вимірювання кутової швидкості $\Omega_{sN}(t)$ на виході ВОГ. Залежність можна записати наступним чином [4]:

$$\Omega_{sN}(t) = \frac{n}{LD} [A\dot{\epsilon}_z(z,t) - B\dot{\epsilon}_r(z,t)](L-2z) dz, \quad (4)$$

де $\dot{\epsilon}_z$ і $\dot{\epsilon}_r$ похідні за часом полів осьової та радіальної деформації в осерді волокна.

Значення А та В в рівнянні (4) визначаються співвідношеннями:

$$A = n(1 - 0.5n^2 p_{12}); \quad B = 0.5n^3(p_{11} + p_{12}),$$

де p_{11} і p_{12} – коефіцієнти фотопружності матеріалу волокна; n – показник заломлення осердя волокна.

Два основні механізми виникнення похибки вимірювання кутової швидкості, що представлені рівняннями (3) та (4), є адитивними. Таким чином, загальна похибка становить:

$$\Omega_{\Sigma}(t) = \Omega_{\Sigma}(t) + \Omega_{sN}(t).$$

Перспективним напрямком проектування ВОГ є створення волоконного контуру без каркасної котушки. Автори роботи [5] стверджують, що при використанні такої конструкції суттєво зменшуються внутрішні напруги у волокні, що спричиняють появу пружно-оптичного ефекту. Похибка вимірювання фази Саньяка при використанні безкаркасної котушки визначається співвідношенням [5]:

$$\Delta\varphi_N(t) \approx \frac{\beta}{v} \frac{dn}{d\epsilon} \int_0^L \left[\frac{d\epsilon}{dt}(z,t)(L-2z) \right] dz, \quad (5)$$

де β – стала розповсюдження електромагнітних коливань; v – швидкість світла; ϵ – деформація у волоконній котушці; L – довжина волоконної котушки; z – координата довільної точки у волоконній котушці.

Оскільки оптичне волокно є видом еластичного середовища, напруження σ пропорційне його деформації і дорівнює:

$$\sigma = \epsilon E, \quad (6)$$

де E – модуль пружності волокна.

Згідно з рівняннями (5) – (6), чутливість волоконної котушки до вимірювання фази Саньяка може бути покращена за рахунок зменшення зовнішнього напруження в волоконній котушці. Тому, щоб запропонувати дієвий метод проектування, спершу треба дослідити зовнішнє напруження в волоконній котушці. Під час процесу намотування волоконної котушки виникають напруження розтягування, згинання та напруження, що обумовлене твердінням клеючої речовини. Крім того, термічне напруження також виникає при зміні температури навколишнього середовища. У волоконній котушці всі чотири типи напружень складаються разом, що впливає на оптико-механічні характеристики волоконної котушки.

В роботі [5] встановлено, що при намотуванні котушки на розбірний каркас виникає загальне напруження σ , що складається з напружень: розтягування σ_F , згинання σ_{max} , скручування σ_b , полімеризації клеючої речовини σ_s і її термічного розширення σ_r . Сумарне напруження визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_F + \sigma_{max} + \sigma_b + \sigma_s + \sigma_r = \\ &= \frac{Fg}{1000\pi r^2} + \frac{Er}{R} + \frac{Er}{R} \sin \theta + \alpha_s E + \alpha_T E \Delta T, \end{aligned} \quad (7)$$

де F – сила розтягування; r – радіус оболонки волокна; R – радіус закручування; θ – кут, що визначає положення точки на каркасі котушки при закручуванні; E – модуль пружності волокна; α_s – коефіцієнт об'ємного стиснення клею; α_T – коефіцієнт термічного розширення клею; ΔT – зміна температури під час процесу полімеризації клеючої речовини.

Згідно з рівнянням (7) ключовими факторами, які впливають на напруження волоконної котушки, є напруженість намотування, радіус закручування і стиснення, термічні показники клеючої речовини.

Коли волоконну котушку намотують з однаковою напругою, напруження волокон на нижніх шарах буде меншим ніж напруження на верхніх шарах. Найбільша різниця напружень може бути розрахована за допомогою рівняння:

$$\frac{F}{\pi r^2} = \frac{T \cos \theta}{\pi r^2} = \epsilon E, \quad (8)$$

де F – сила вздовж осі волокна; T – розтягуюча сила під час процесу намотування; θ – кут між F і T ; r – радіус оболонки волокна; ϵ – деформація волокна; E – модуль пружності волокна.

Методи зменшення впливу температурних градієнтів на чутливість ВОГ

З рівнянь (2) і (3) видно, що ділянки волокна, більш віддалені від середньої точки волокна, вносять більш суттєвий внесок у похибку вимірюван-

ня кутової швидкості, ніж ближчі до середини волокна. З рівнянь (2) і (3) також видно, що, якщо в котушці волокна забезпечується просторово симетричний розподіл температури по обидва боки від середньої точки котушки, термоіндукована похибка може бути компенсована. Тому потрібно постійно досліджувати деякі нові методи намотування волокон. Серед таких методів може бути запропонований спеціальний квадрупольний метод намотування, схема якого приведена на рис. 2.

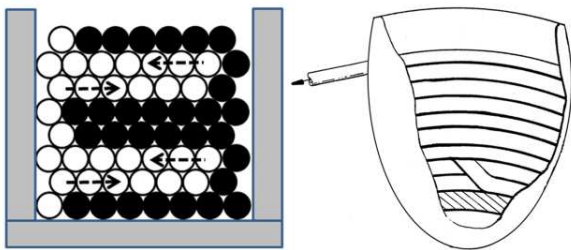


Рис. 2. Метод спеціального квадрупольного намотування

Порівняно зі звичайним методом квадрупольного симетричного намотування, розглянутим у [3, 9], волокно не буде стискатися під час зміни шарів і радіус закручування для кожного шару буде практично однаковим. Волокно буде плавно переходити з внутрішнього шару на зовнішній шар, що призводить до уникнення бічного тиску.

Однак цей метод намотування все одно не дає остаточної компенсації термоіндукованих дрейфів ВОГ. Причина в тому, що хоча ідеальна волоконна котушка може бути ефективною для придушення ефекту Шупе в певному напрямку, вона не є ефективною для будь-якого напрямку, у якому градієнт температури може перетинати котушку.

Перевагу треба надавати котушці з симетричним розподілом температури. Одне з рішень цієї проблеми – використання котушки, що відводить тепло. Котушка, що відводить тепло, не тільки сповільнює коливання температурного поля котушки, тобто зменшує значення $\dot{T}(z, t)$ та $\dot{T}(L-2z)$ в рівняннях (2) і (3), але і прискорює вирівнювання температури всередині котушки зменшенням різниці $\dot{T}(z, t) - \dot{T}(L-2z)$. У поєднанні зі спеціальними методами намотування волокна ці кроки дозволяють мінімізувати температурні дрейфи у ВОГ.

Інший підхід полягає в тому, щоб в якості матеріалу каркасу котушки використовувати речовини з тим самим лінійним температурним коефіцієнтом розширення, що і у волокна, наприклад, кварцеве, або графітове скло.

Для мінімізації термоіндукованої дрейфової похибки, спричиненої зміною показника заломлення, можна застосувати три методи.

Перший метод полягає у використанні певного типу волоконного матеріалу з нечутливими до температури властивостями, наприклад, фотонно-зондового волокна (ФЗВ) з повітряною серцевиною.

Другий метод полягає у використанні нового клею. В обмеженому температурному діапазоні термічні параметри клею для заливки (такі як коефіцієнт розширення, теплопровідність і модуль пружності) змінюються з температурою, тому розподіл напружень у котушці волокна буде відрізнятися, що може зруйнувати стабільність. Для того, щоб теплові параметри клею для заливки відповідали тепловим параметрам оптичного волокна треба використовувати деякі нові клеї, наприклад, графітовий клей.

Для зниження усадки об'єму клею ефективним способом є додавання в клей неорганічних наноматеріалів. Оскільки неорганічні наноматеріали не беруть участь в процесі полімеризації, об'ємний вміст клею зменшується за рахунок додавання цих матеріалів. Таким чином усадка клею знижується. Додані матеріали зменшують коефіцієнт теплового розширювання та покращують теплопровідність. В якості наноматеріалів може бути використано SiO_2 .

Третій метод полягає у використанні своєрідного температурного гомогенізатора, що покращує однорідність клеючої речовини.

Для зменшення напружень розтягування, згинання, скручування у волоконній котушці під час намотування може бути запропонований метод зміненої натяжки намотування, який складається з трьох кроків.

По-перше, на основі діаметра волокна, типу волокна, діаметра рамки для намотування провести попереднє експериментальне намотування, за яким отримати криву деформацій волокна.

По-друге, на основі кривої розподілу деформацій розрахувати різницю напружень між різними шарами волокна згідно рівняння (8) та з допомогою визначеної різниці отримати таблицю напружень різних шарів.

Третій етап – волоконну котушку намотувати змінною силою відповідно до таблиці напружень.

Висновки

Врахування проведених досліджень дадуть можливість розробникам підвищувати класи точності ВОГ, які зараз поділяються на три категорії [10]: низької («open-loop»), середньої («closed-loop») і високої («high-loop») точності. Відповідно до цих класів точності чутливість вимірювання кутової швидкості обертання ВОГ повинна знаходитися в межах: $(1 \div 10)$ град/год; $(0,01 \div 1)$ град/год; $(0,0001 \div 0,01)$ град/год.

Кожен з трьох класів гіроскопів знайшов своє застосування в інерціальних системах керування рухомими об'єктами різного призначення. Основним обмеженням по чутливості, яке приходить долати проектувальникам, є термічно індукований дрейф нуля. Частина методів вирішення вказаної проблеми розглянуті в цій статті. Однак постійно вдосконалюються елементна база і засоби обробки

сигналу ВОГ, здійснюється перехід на інтегрально-оптичні технології, що відкриває нові шляхи з мінімальними витратами підвищити чутливість ВОГ. Аналізу цих питань можуть бути присвячені наступні дослідження в цьому напрямку.

Література

- [1] О. К. Кучеренко, *Волоконно-оптичні гіроскопи: навчальний посібник*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54613>
- [2] D. M. Shupe, "Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer", *Appl. Opt.*, vol. 19, pp. 654-655, 1980.
- [3] Friedemann Mohr, "Thermo-optically Induced Bias Drift in Fiber Optical Sagnac Interferometers", *Journal of lightwave technology*, vol. 14, no. 1, pp. 27-41, 1996.
- [4] Xuyou Li, Weiwei Ling, Kunpeng He, Zhenlong Xu and Shitong Du, "A Thermal Performance Analysis and Comparison of Fiber Coils with the D-CYLWinding and QAD", MDPI, *Sensors*. 16(6), 2016. DOI:10.3390/s16060900
- [5] Lianjie Shan, Jing Li, Junli Liu, Hao Su, Yingchun Liang, "Low strain variation design method of the quadrupolar fiber coil based on the comprehensive stress analysis", *Optoelectronics and advanced materials - Rapid communications*, vol. 11, no. 5-6, pp. 342 – 348, 2017.
- [6] Serdar Ogut, Berk Osunluk, Ekmel Ozbay, "Modeling of thermal sensitivity of a fiber optic gyroscope coil with practical quadrupole winding", in *Proc. SPIE10208, Fiber Optic Sensors and Applications XIV*, 1020806 (27 April 2017); California, United States. DOI: 10.1117/12.2258030.
- [7] Schadt, F., *Physikalische Modellierung und Analyse thermisch und mechanisch bedingter Messabweichungen in faseroptischen Rotationsensoren*, Ph.D. dissertation, University Magdeburg (2002).
- [8] S. Minakuchi, "Thermal strain in lightweight composite fiber-optic gyroscope for space application", *J. Lightwave Technol.* 33(12), pp. 2658-2662, 2015.
- [9] F. Mohr, F. Schadt, «Bias error in fiber optic gyroscopes due to elasto-optic interactions in the sensor fiber», *Proc. SPIE*, 5502, pp. 410-413, 2004.
- [10] A. Ohno, A. Kurokawa, T. Kumagai, S. Nakamura, and K. Hotate, "Applications and Technical Progress of Fiber Optic Gyros in Japan", *Optical Fiber Sensors*, 2006.

UDC 681.2.084: 681.2.088

О. К. Кучеренко

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
METHODS OF REDUCING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE GRADIENTS ON THE SENSITIVITY OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE

Thermally induced error is one of the main limitations of the sensitivity of fiber-optic gyroscopes (FOGs). The analysis of thermal sensitivity of FOG is based on the study of the Shupe effect and the elastic-optical effect in the fiber circuit. The main requirement in this case is to preserve the principle of reciprocity for rays propagating in opposite directions of the fiber circuit. It was determined that the thermally induced phase difference of these rays should not exceed $\Delta\varphi(t) \approx 10^{-7}$ rad. To reduce the thermal sensitivity of FOG, various methods are used, including quadrupole methods of winding the fiber circuit, using frameless coils, as well as coils made of special materials. Considerable attention is paid to improving the properties of fiber and adhesive compounds to minimize the effect of temperature on the optical-physical characteristics of these components of the fiber circuit. The article examines the advantages and disadvantages of each of the methods of compensating the thermally induced error of FOG. Analytical relations characterizing the effect of temperature gradients on the sensitivity of measuring angular velocity and Sagnac phase when using FOG are given. Part of the methods for solving this problem are discussed in this article. However, the elemental base and FOG signal processing tools are constantly being improved, the transition to integrated optical technologies is being carried out, which opens up new ways to increase the sensitivity of the FOG with minimal costs. On the basis of the conducted research, practical recommendations are given to reduce the influence of temperature gradients on the sensitivity of FOG. The work can be useful for specialists working in the field of FOG design.

Key words: fiber-optic gyroscope (FOG); thermally induced error of FOG; fiber coil; Shupe effect; elastic-optical effect; quadrupole and special quadrupole wet fiber; adhesive compound.

*Надійшла до редакції
10 січня 2024 року*

*Рецензовано
22 травня 2024 року*



© 2024 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).