



УКРАЇНА

(19) UA (11) 89885 (13) C2  
(51) МПК (2009)  
H01S 3/00  
G01C 19/72

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

### (54) ОДНОМОДОВИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ГІРОСКОП

1

(21) а200809177  
(22) 14.07.2008  
(24) 10.03.2010  
(46) 10.03.2010, Бюл.№ 5, 2010 р.  
(72) МАКАРОВ ТЕРЕНТІЙ ВАРФОЛОМІЄВИЧ  
(73) ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗ-  
КУ ІМ О.С.ПОПОВА  
(56) UA 6342 U, 16.05.2005  
UA 86696 C2, 10.07.2008  
RU 2039934, 20.07.1995  
RU 2236690, 20.09.2004  
RU 2296949, 10.04.2007  
JP 2000028369, 28.01.2000  
US 6563967, 13.05.2003  
US 6990269, 24.01.2006  
(57) Одномодовий волоконно-оптичний гіроскоп,  
який містить котушку з витками одномодового оп-

2

тичного волокна великої довжини, що забезпечує необхідну чутливість, поляризатор, розгалужувач оптичної потужності, пристрої оптичного узгодження, пристрій для підвищення стабільності нульової точки, джерело оптичного випромінювання і фотоприймальний пристрій, який відрізняється тим, що в одномодовому волокні в котушці витки волокна укладаються на диски по спіралі Архімеда, однобічно чи двобічно, з переходом на протилежну сторону через отвір в центрі диска, в канавки (борозенки), радіус кривизни яких більший від мінімально припустимого на злам оптичного волокна, ширина і глибина яких з урахуванням температурних змін навколишнього середовища більша від діаметра оптичного волокна з захисним його покриттям, а сумарна довжина канавок дорівнює або більша від довжини оптичного волокна.

Винахід відноситься до квантової електронної техніки. Волоконно-оптичні гіроскопи на основі інтерферометрів з кільцем із оптичного волокна відносяться до систем, в яких відсутні будь-які рухомі деталі. Гіроскопи виконують функцію детектора кутової швидкості в інерціальному просторі, будучи, наприклад, елементом навігаційної системи, що оброблює інформацію про місцезнаходження самолёта чи корабля з метою виведення його на курс, в геофізиці, в цифрових фотоапаратах та ін. До складу цієї системи, як правило, входять три гіроскопи - для вимірювання швидкості обертання навколо трьох ортогональних осей.

Принцип дії оптичного гіроскопа засновано на ефекті Саньяка. По замкнутому оптичному путі, одномодовому оптичному волокні, як показано на Фіг.1, завдяки розгалужувачу променю, світло поширюється у двох протилежних напрямках. Якщо при цьому система знаходиться у спокою відносно інерціального простору, обидва промені поширюються зустрічно по оптичному путі однакової довжини. Однак, коли оптична система обертається в інерціальному просторі з кутовою швидкістю  $\Omega$ , між оптичними хвилями, з'являється різниця фаз [1]

$$\Delta\varphi = 4\pi S\Omega/c,$$

(1)

де  $S$  - площа, що охоплюється оптичним путем;  $k$  - хвильове число;  $c$  - швидкість світла. За вимірюванням різниці фаз  $\Delta\varphi$  визначається кутова швидкість  $\Omega$ . Різниця фаз не залежить від форми оптичного путі, положення центру обертання і коефіцієнта заломлення. Існують декілька типів гіроскопів, заснованих на ефекті Саньяка, у тому числі і волоконно-оптичних.

В якості найближчого аналога обрано схему волоконно-оптичного гіроскопа (Фіг.1), яка містить: котушку (кільце) із одномодового волокна 1; поляризатор 2; пристрої для узгодження волокна з поляризатором і розгалужувачем оптичного променя 3; пристрій для підвищення стабільності нульової точки (частина схеми, що обведена штриховою лінією) 4; джерело оптичного випромінювання 5; фотоприймальні пристрої 6; фільтр мод 7.

Волоконно-оптичний гіроскоп (Фіг.1) має високу чутливість, завдяки використанню довгого одномодового оптичного волокна з низьким затуханням (котушка із довгого волокна). При цьому формула (1) приймає вид [1]

$$\Delta\varphi = 4\pi La\Omega/c\lambda,$$

(2)

де  $L$  - довжина волокна в котушці;  $a$  - радіус котушки;  $\lambda$  - довжина хвилі.

(13) C2

(11) 89885

(19) UA

Слід зауважити, що в приведених формулах не фігурує коефіцієнт заломлення світла в волокні. Це обумовлено тим, що вказані формули отримані без урахування невзаємного перетікання потужностей взаємоортогональних хвиль у вигнутому по спіралі (у котушці) одномодовому волокні.

Автором запропонованого рішення доведено, що при укладанні одномодових оптичних волокон на деякий круговий циліндр по спіральних лініях, зокрема по дузі кола, у них спостерігається метрична і діелектрична анізотропія [2], які виявляються в двоприменезаломленні [3], різних фазових швидкостях поширення основних незвичайної  $HE_{11}^e$  і звичайної  $HE_{11}^o$  хвиль із взаємоортогональними поляризаціями [4]. Крім того, в спіральному одномодовому оптичному волокні (СОМОВ) спостерігається невзаємне перетікання потужностей у площині поперечного перерізу між зазначеними хвилями [5]. Ці потоки потужностей невзаємного зв'язку між зазначеними хвилями визначаються поляризацією хвиль на вході СОМОВ, координатами поперечного перерізу СОМОВ, кроком спіралі  $p$  і радіусом  $R$  вигнутої по спіралі осі СОМОВ. Саме ці потоки потужностей породжують основні шуми, тобто шумову модуляцію інтенсивностей приймання хвиль, що протилежно поширюються в волокні та тремтіння їх фаз. Особливості невзаємних впливів між зазначеними хвилями в залежності від співвідношення  $0 \leq p/4\pi R \leq \infty$  досліджені в роботах [6,7] де, зокрема, показано, що у вигнутому по дузі кола ОВ ( $p/4\pi R = 0$ ) невзаємні впливи між зазначеними хвилями цілком відсутні. При цьому будуть відсутні й зазначені шуми на виході ОМОВ та нестабільність поляризаційного стану хвиль. Разом з тим, при невеликих змінах співвідношення  $p/4\pi R$  в межах  $0 \leq p/4\pi R \leq 0,05$ , що спостерігається у котушках з волокном, відносні потужності, невзаємних впливів швидко зростають від  $-\infty$  до  $-20$ дБ відповідно. Це супроводжується збільшенням шумів на виході волоконно-оптичного чутливого кільця (котушки) (див. Фіг.1), а також коливанням поляризаційного стану зустрічних хвиль в котушці 1 впродовж ОВ.

Поставлена задача зменшення рівня шумів та стабілізації поляризаційного стану на виході зазначеного кільця гіроскопа. Пропонований волоконно-оптичний гіроскоп містить ті ж самі елементи, що і прототип (Фіг.1), а саме: кільце із одномодового волокна, два пристрою для узгодження ОМОВ з розгалужувачем оптичного променя, пристрій для підвищення стабільності нульової точки (частина схеми, що обведена штриховою лінією), джерело випромінювання (лазер) і фотоприймальний модуль.

Технічним рішенням даної задачі є укладання одномодового оптичного волокна в канавки (борозенки) на плоских дисках 1 по спіралях Архімеда, прообразом яких можуть бути грамофонні диски з отвором радіуса  $r_0$  у центрі. Укладання оптичного волокна на диску може бути як одностороннє, так і двостороннє, праве з однієї сторони і ліве - з іншої або навпаки, що несуттєво. Укладання волокна варто починати із зовнішнього (великого) радіуса диска, а перехід на іншу сторону диска здійснювати при малих внутрішніх радіусах (див. Фіг.2, виконану схематично):

а) - вид укладання оптичного волокна по спіралі Архімеда в плані;

б) - вид А переходу оптичного волокна на іншу сторону диска з ребра, де 1 - диск з канавками з двох сторін; 2 - оптичне волокно, покладено в канавки з верхньої сторони диска; 3 - місце переходу волокна з верхньої сторони на нижню сторону; 4 - оптичне волокно, покладене в канавки з нижньої сторони диска; 5 - початок оптичного волокна; 6 - кінець оптичного волокна.

Глибина і ширина канавок  $B$  з урахуванням температурних змін повинна бути трохи більше діаметра волокна ( $2b \approx 120-130$ мкм із захисним покриттям товщиною  $2\Delta \approx 20$ мкм і більш із запасом) і складати  $B \approx 1$ мм.

Довжина спіральної канавки, чи волокна  $L$  може бути визначена як сума довжин  $M$  витків, покладених на диску. Довжина окремого  $i$ -го витка волокна приблизно дорівнює  $l_i \approx 2\pi r_i$ . Тоді вся необхідна довжина волокна визначається у виді:

$$L \approx 2\pi(r_0 + r_1 + r_2 + \dots + r_m),$$

де  $r_0$  - мінімальний радіус витка оптичного волокна на диску, а різниця радіусів сусідніх витків  $r_{i+1} - r_i = B$ ; радіус довільного витка  $r_m = r_0 + B(M-1)$ . Сума членів у дужках, що представляють арифметичну прогресію, дорівнює  $M(r_0 + r_m)/2$ . Звідси випливає, що

$$L = \pi M[2r_0 + B(M-1)]. \quad (3)$$

З іншого боку, максимальна довжина  $L$  оптичного волокна на диску визначається необхідною величиною чутливості гіроскопа. Невідомими конструктивними параметрами, таким чином, є число витків спіралі Архімеда  $M$  і мінімальний радіус витка  $r_0$ , який повинен бути більше мінімально припустимого по розумінням міцності оптичного волокна на злам ( $r_0 > 3,413b$  [8]).

В загальні,  $r_0$  має бути як можна великим, тому що згідно (2) різниця фаз пропорційна радіусу котушки.

Тоді квадратне рівняння (3) відносно  $M$  подається у виді:

$$\pi M^2 B + (2\pi r_0 - \pi B)M - L = 0,$$

позитивний корінь якого дорівнює

$$M = \frac{-(2\pi r_0 - \pi B) + \sqrt{(2\pi r_0 - \pi B)^2 + 4L\pi B}}{2\pi B} \quad (4)$$

Наведемо деякі розрахунки. При  $L = 100$ м,  $r_0 = 1$ см одержимо  $M \approx 189$  витків, що, якщо укласти на диску з однієї сторони в один шар, утворять зовнішній радіус диска, який дорівнює  $R_1 = r_0 + MB \approx 20$ см.

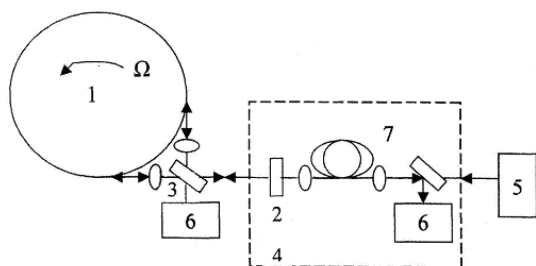
Доцільно використовувати двостороннє, праве і ліве укладання довжин  $L/2$  по  $M_2 = 95$  витків оптичного волокна на кожній із сторін диска зовнішнього радіуса  $R_2 \approx 10,5$ см.

Якщо обрати  $L = 1000$ м, то згідно (2) різниця фаз на виході гіроскопу збільшиться в 10 разів. Тоді для укладання цієї довжини волокна на диск з однієї сторони потребується радіус диска  $R_1 \approx 56,5$ см; при укладанні цієї довжини на диск з двох сторін потребується радіус диска  $R_2 \approx 40$ см; і на кінець, при укладанні волокна на двох дисках по 250м на кожній із чотирьох сторін радіуси дисків повинні бути по 28,3см.

Укладання оптичного волокна на диску визначає стабільну поляризацію звичайної введеної в начало волокна хвилі  $HE_{11}^0$ , що поширюється, перпендикулярну площині диску. Тому плавні локальні вигини оптичного волокна в площині перпендикулярній тонким дискам, зв'язані з необхідністю переходу волокна на іншу його сторону, не критичні, тобто не викликають додаткового зв'язку взаємоортогональних хвиль, і отже, шумів. Тому можна збільшувати число дисків при необхідності збільшення довжини  $L$  волокна, і отже чутливості гіроскопу. При цьому диски можна насаджувати з проміжками на єдину вісь.

Це забезпечує зменшення внутрішніх і зовнішніх різниць температур на диску і отже, зменшення дрейфу сигналу на виході гіроскопа, який пропорційний похідній за часом від різниці температур.

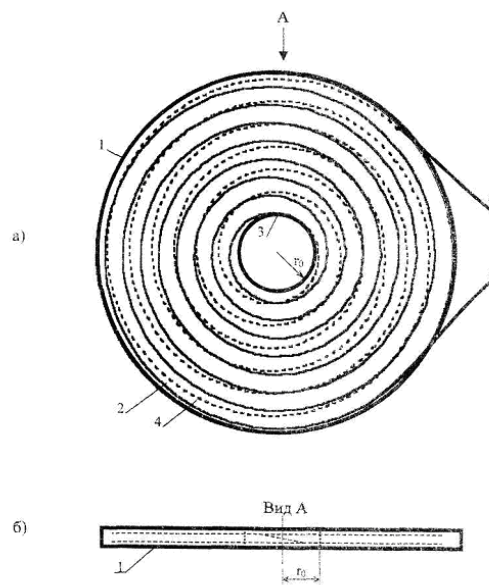
Отже, доцільно вводити в начало одномодового волокна поляризацію звичайної хвилі  $HE_{11}^0$ , перпендикулярну площині диску, що виконується поляризатором 2. Важливо, щоб при укладанні оптичного волокна в канавки на диски, воно не здобувало додаткового неконтрольованого крутіння відносно його осі, тому що крутіння матеріалу волокна призводить до перетікання потужностей між взаємноортогональними хвилями [6, 7] і, отже, до зростання шумів на виході волокна і нестабільності поляризації.



Фіг. 1

#### Використана література

1. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. Пер. с япон. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 256с.
2. Макаров Т.В. Анизотропия изогнутых волоконных световодов. //Праці УНДІРТ. - Одеса, №1, 1995, с.103-106.
3. Макаров Т.В. Лучепреломления в изогнутых и скрученных волоконных световодах. //Праці УНДІРТ. - Одеса, №2, 1995, с.93-96.
4. Макаров Т.В. Метод определения волн в изогнутых световодах. //Праці УНДІРТ. - Одеса, №1 (5), 1996, с.82-91.
5. Макаров Т.В. Потоки мощностей сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. //Праці УНДІРТ. - Одеса, №2 (30), 2003, с.39-44.
6. Макаров Т.В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных волоконных световодах. Часть 1 //Праці УНДІРТ. - Одеса, №2 (38), 2004, с.23-34.
7. Макаров Т.В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных волоконных световодах. Часть 2 //Праці УНДІРТ. - Одеса, №2 (38), 2004, с.23-34.
8. Макаров Т.В. Динамика и структура изломов волоконных световодов. //Электросвязь. - М. №9, 1995, с.1-5.



Фіг. 2