

Żyroskop światłowodowy – fizyczne podstawy działania



Spis wykładu

- Historia efektu von Laue-Sagnaca: od eteru do względności
- Efekt/eksperyment Sagnaca
- Oryginalny eksperyment Sagnaca
- Żyroskop optyczny – powiększony efekt von Laue-Sagnaca
- FOG – kto pierwszy?
- FOG – odwracalność
- FOG a serendepity!!!

Historia efektu von Laue-Sagnaca: od eteru do względności

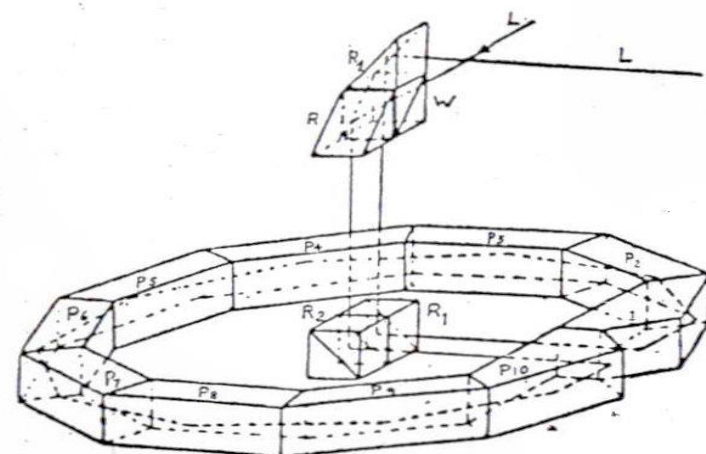
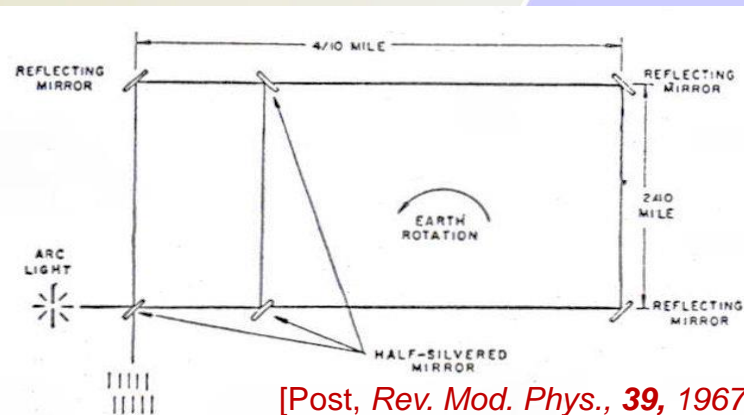
- W XVIII wieku (1678), newtonowska korpuskularna teoria światła zostaje zastąpiona falową teorią Huygensa – (patrz zasada Christiaana Huygensa -1678)
- W początkowych latach XIX wieku (1803) Young za pomocą dwuszczelinowego interferometru demonstruje falową naturę rozchodzenia się światła - (patrz interferometr Thomasa Younga – 1803), jednakże w tamtym okresie rozchodzenie się fali wymagało występowania ośrodka je przenoszącego – powstaje pojęcie „eteru świetlnego”! (świat wypełnia EŚ o bardzo małej gęstości i dużej sprężystości, przyciągany przez ciała, wokół których gęstość EŚ jest większa, zaś światło wysyłane przez ciała powoduje drgania w EŚ - patrz postulaty Younga – 1801)
- W roku 1820, Augustin-Jean Fresnel proponuje teorię częściowego unoszenia EŚ przez materię - ciała przezroczyste (prędkość rozchodzenia się fal jest funkcją gęstości i współczynnika sprężystości ośrodka - skoro światło w ciele rozchodzi się wolniej niż w powietrzu zatem gęstość EŚ w ciałach jest większa)
- W roku 1851, Armand-Hippolyte-Louis Fizeau eksperymentalnie potwierdza przewidywane przez Fresnela unoszenie, efekt unoszenia Fresnel-Fizeau (współczynnik unoszenia $\alpha=1-[n^2 + d(\ln n)/d(\ln \lambda)]$) interferometer użyty przez Fizeau to interferometr pierścieniowy podobny do nazywanego obecnie interferometrem Sagnaca)
- W roku 1887, słynne doświadczenie Albert A. Michelsona i Edward W. Morley'a pokazuje, iż koncepcja EŚ „powinna być traktowana jako nieprawdziwa”
- W roku 1905, Albert Einstein formułuje STW oraz wyjaśnia zewnętrzny efekt fotoelektryczny
- W roku 1907, Max von Laue wyjaśnia, że efekt unoszenia Fresnel-Fizeau jest prawem dodawania prędkości w STW, zatem unoszenie Fresnel-Fizeau jest efektem relatywistycznym!

Efekt/eksperyment Sagnaca

- W 1904, Michelson zaproponował użycie interferometru pierścieniowego do pomiaru obrotu ziemskiego jako układu przytwierdzonego do Ziemi (eksperyment został wykonany z Henry G. Gale w 1925 r.).
- W 1911, von Laue publikuje pracę: *Über einen Versuch zur Optik der bewegten Körper* w *Münchener Sitzungsberichte*. 1911, 405-412, opisującą to co dziś określamy jako «efekt Sagnaca» i jasno stwierdzającą, że efekt ten może być wyjaśniony zarówno klasycznie jak i relatywistycznie
- W 1911, niemiecki student Harress [opis 1914 – Harzer] przeprowadza w swej dyplomowej pracy bardzo podobny eksperyment celem pomiaru dyspersyjnych własności szkieł na bazie określania współczynnika unoszenia Fresnel-Fizeau; najwyraźniej zakładając, iż obserwowane przesunięcie prążków dla obracanego układu jest wyłącznie właściwe „unoszeniu” światła przez poruszający się szklany ośrodek.

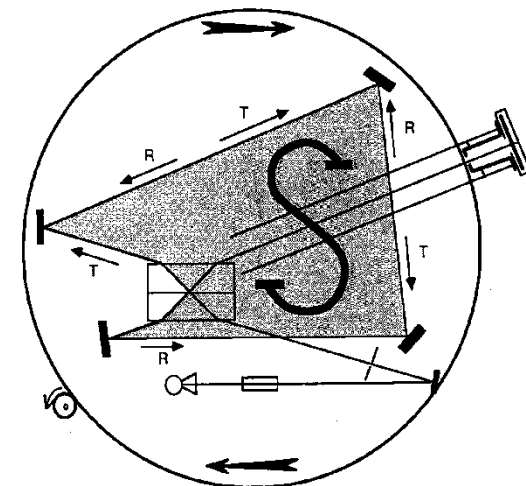
Rok 1913, Sagnac “eksperyment” - społeczność naukowa jasno stwierdza, że jest to eksperyment Sagnaca, jednakże uczciwie jest mówić o efekcie “Von Laue - Sagnac”!

Dlaczego jest to efekt relatywistyczny? Otóż dlatego, że nie ma wpływu ośrodka na ten efekt! (podobnie jak unoszenie Fresnel-Fizeau także jest efektem relatywistycznym).



Oryginalny eksperyment Sagnaca

- George Sagnac chciał pokazać, że nowa STW Alberta Einsteina jest nieprawdziwa oraz, że EŚ istnieje!
- Interferometr pętlowy, gdzie dwa przeciwne kierunki w obrotowej pętli „widzą” nieznacznie różne drogi optyczne.
- Pojedyncza pętla o powierzchni $S=1 \text{ m}^2$ dawała przesunięcie prążków około $\lambda/10$ dla obrotu z szybkością kilku obr/s (dzisiaj dla FOG mamy: 10,000 pętli ... i $\lambda/10^{10}$!)



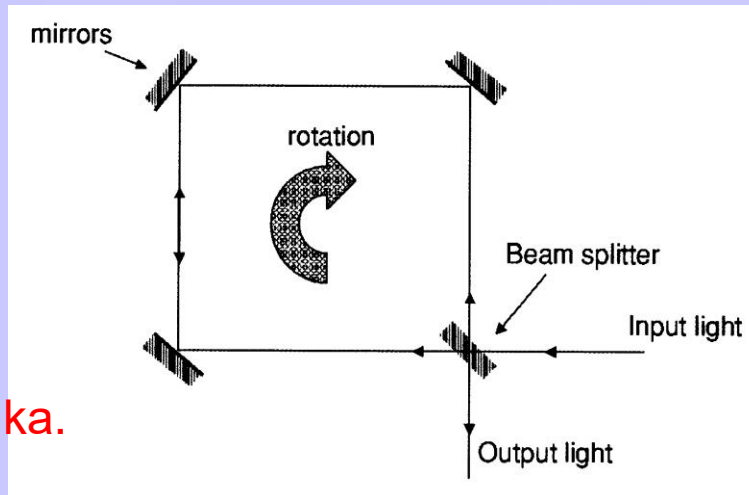
[Post, Rev. Mod. Phys., 39, 1967]

Obserwowane przesunięcie prążków opisuje reguła:

$$\Delta Z = 4\Omega \cdot S / \lambda_0 c$$

oraz jest niezależne od:

- kształtu powierzchni S ,
- lokalizacji środka obrotu,
- obecności obracającego się przezroczystego ośrodka.

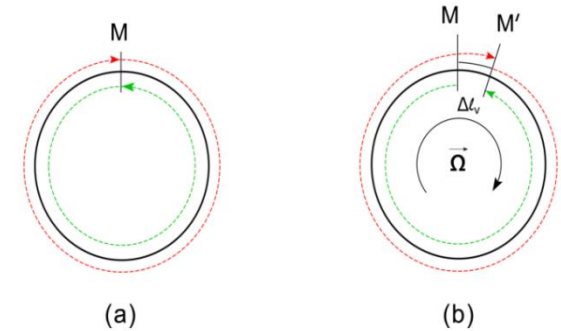


Pytanie: obrót ale względem czego?

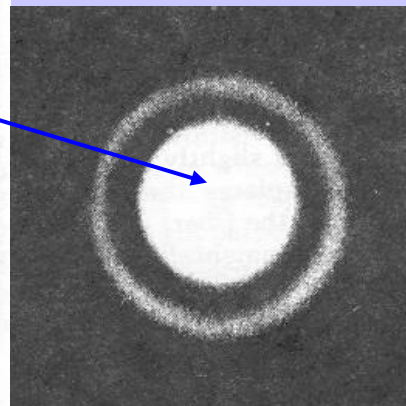
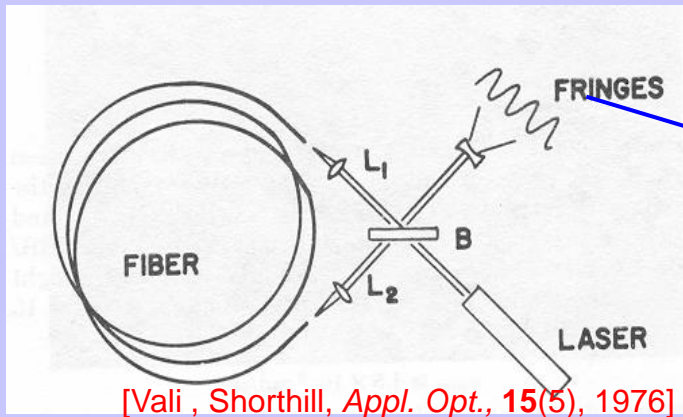
Odpowiedź – względem tzw. przestrzeni inercjalnej (ułomna definicja). Interferometr Sagnaca mierzy obrót względem gwiazd stałych, a nie względem powierzchni Ziemi.

Żyroskopy optyczne – powiększony efekt von Laue-Sagnac

- Von Laue-Sagnac efekt: droga zgodna z obrotem jest dłuższa niż jeden obwód, przeciwnie biegnąca droga jest krótsza
- Zwiększenie poprzez zwielokrotnienie:
 - pierścieniowa wnęka laserowa w Ring-Laser-Gyroscope lub laser-gyro lub RLG (1963),
 - wielozwojowa pętla włókna w Fiber-Optic-Gyroscope lub fiber-gyro lub FOG (1976).



Typowo, dla najlepszych właściwości konieczne jest 10^4 zwielokrotnień w obu przypadkach: $Q = 10^4$ dla RLG i 10^4 zwojów dla FOG (3 km włókna na 10 cm średnicy pętli).

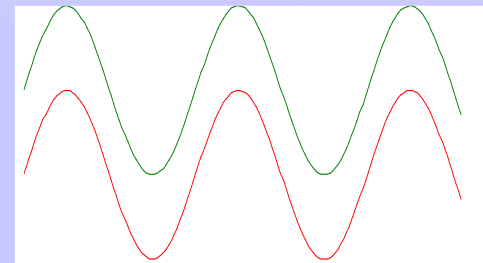


[Vali, Shorthill, *Appl. Opt.*, 15(5), 1976]

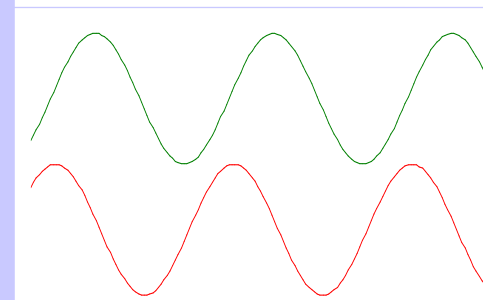
$L=10 \text{ m}$, $D=15 \text{ cm}$, $\lambda = 0.63 \text{ um}$

$$\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega$$

$\Omega = 0$



$\Omega \neq 0$



Przesunięcie fazowe wzrasta z L - praktyczna droga dla budowy FOG

FOG – kto pierwszy?

University of Utah
 (301) 581-7100
 5363-4411

APR 23 1975
 For Immediate Release

NEW LASER GYROSCOPE DEVELOPED AT UTAH

A new concept in laser gyroscopes that will increase the accuracy and reduce the cost of air navigation instruments is being developed by research physicists at the University of Utah.

The new instrument has a theoretical accuracy of 80 meters for each hour of flight time at any point. The best conventional gyros now available have an accuracy of one to three nautical miles per hour of flight time.

Since the new laser gyro makes use of a spiral conducting fiber to direct the laser beam, the proposed improved accuracy in navigation will be limited only by the development of better optical fibers.

The developers of the new instrument are Dr. Victor Vali, a research physicist with the U of U Research Institute.

Research Proposal Submitted to the National Science Foundation

Proposed Amount: \$ 75,357

Proposed Effective Date: 6-1-75

Proposed Duration: 12 months

Title: **GEOPHYSICAL LASER GYROSCOPE**

Principal Investigator: Victor Vali
 Social Security #

University of Utah Research Institute
 Geospace Sciences Laboratory
 University of Utah
 105 Applied Research
 Salt Lake City, Utah 84112

Co-Principal Investigator: Richard W. Shorthill
 Social Security #

(Same Address)

Make Grant To: University of Utah Research Institute

Endorsements:

Principal Investigator

Co-Principal Investigator

Victor Vali
 Victor Vali
 Research Physicist
 Geospace Sciences Laboratory
 Phone: 801/581-5363

Richard W. Shorthill
 Richard W. Shorthill
 Director and Research Physicist
 Geospace Science Laboratory
 Phone: 801/581-6100

References

1. G. Joos, *Theoretical Physics* (Hafner, New York, 1950), p. 471.
2. E. J. Post, *Rev. Mod. Phys.* **39**, 475 (1967).
3. S. Balsamo, S. Ezekiel, and V. Vali, *Laser Focus* **11**, 8 (1975).
4. G. E. Moss, L. R. Miller, and R. L. Forward, *Appl. Opt.* **10**, 2495 (1971).
5. J. Kilpatrick, *IEEE Spectrum*, **44** (October 1967).

Fiber beampaths expected to enhance laser gyro's accuracy and slash cost

A laser gyroscope could be improved by directing laserbeams through an optical fiber winding them around a ring with researchers at the University of Utah. The fiber would direct the beams around the ring many times; in conventional laser gyroscopes the beams travel around a circle only once. A prototype of the fiber-optic laser gyroscopes was developed by researchers Victor Vali and Richard W. Shorthill. They submitted a proposal to the National Science Foundation for the construction of a ring-laser gyroscope.

Laser Focus June 1975

proposal to
 National Science Foundation
 LASER GYROSCOPE

Abstract

It is proposed to build a prototype of a ring laser geophysical gyroscope. The maximum size, and therefore the most sensitive, of such an instrument is 100 meters square. This physical size can be reduced by making the laser cavity loop around a smaller area many times. It is shown that by keeping the cavity length constant and winding it around a smaller area, the sensitivity of the instrument remains constant. This is accomplished most conveniently by using a single mode optical fiber as part of the laser cavity—all except the discharge tube. The prototype instrument is to be built such that it can be expanded to a full scale field instrument by increasing the number of loops of the optical fiber to the maximum value.

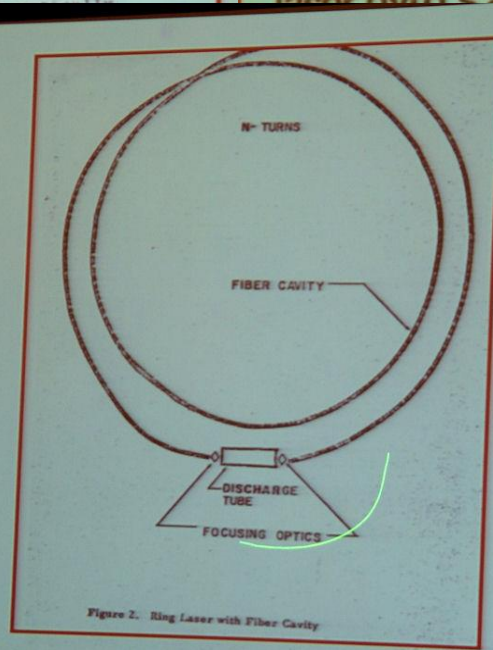


Figure 2. Ring Laser with Fiber Cavity

file of
 piled
 notes

Gyroscopes sensitivity

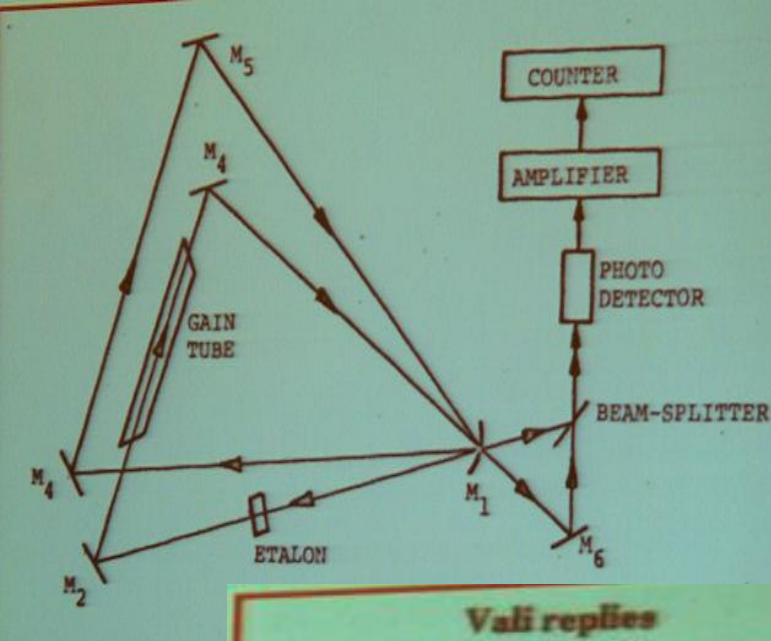
In your report on laser-gyroscopes research at the University of Utah [J. Opt. Soc. Am. 68], you mention a design for "ring-interferometer laser gyroscopes with multiple turns to increase the gyro sensitivity to inertial rotation. We wish to point out that while the sensitivity of a single-turn interferometer increases with addition of turns, the sensitivity of a ring laser gyroscope does not, and the sensitivity of a multiple laser gyroscopes is the same as that of a single-loop gyro.

In the Sagnac interferometer, the difference in the path length seen by the CW and CCW beams is related to the rotation rate by the equation:

$$\Delta L = \frac{4A}{c} \Omega$$

where A is the enclosed area, Ω is rotation rate, and c is the velocity of light.

In a ring laser, the pathlength difference ΔL manifests itself as a frequency difference Δf between the



Sagnac Ring Laser Rotation Sensor

for a ring laser

$$\Delta f = f \frac{\Delta P}{P} = \frac{4A}{\lambda P} \Omega$$

with an N turn resonator

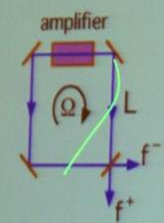
$$\Delta f = \frac{4AN}{\lambda PN} \Omega = \frac{4A}{\lambda P} \Omega$$

But if one simplifies too early

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda P} \Omega = \frac{4L^2}{\lambda 4L} \Omega = \frac{P}{4\lambda} \Omega$$

with N turns

$$\Delta f = \frac{PN}{4\lambda} \Omega$$



- P -- cavity perimeter
- A -- area enclosed
- λ -- mean wavelength of laser
- Ω -- rotation rate
- f^+ -- CW laser frequency
- f^- -- CCW laser frequency

Vali replies

I agree with most of what Balsamo and Ezekiel say about the ring laser gyroscope, but their definition of laser gyroscope is restricted to only the ring laser. A gyroscope is an instrument that senses rotation. Therefore both the ring laser and the laser ring interferometer are laser gyroscopes. Both are based on the Sagnac effect.

They omit the fact that in a refracting medium such as the fiber the beat frequency in a ring laser gyroscope is decreased by a factor of 1/n where n is the index of refraction, while in a laser ring-interferometer gyroscope the fringe shift is independent of n.

Our results with a free-air ring

Conclusion:

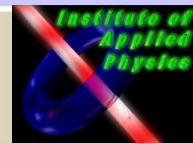
New ideas should always be encouraged and applauded even if they don't quite work out the first time around!

Na podstawie wykładu FOGs na OFS-18 Cancun, Mexico 2006

In contrast, we constructed a double-loop square Sagnac interferometer approximately one meter on a side, and measured the pathlength difference between the CW and CCW beams as a function of rotation and compared it with the single-loop interferometer. As expected, the sensitivity of the double-loop Sagnac interferometer was twice that of the single-loop one.

SALVATORE BALSAMO and SHAOUL EZEKIEL research laboratory of electron-

Laser Focus November 1975





- Pierścień rezonansowy: 10 - 30 cm obwodu.
- He-Ne plazma laser z wysoko-napięciowym zasilaniem.
- Bardzo prosta odbiór sygnału: częstotliwość zdudnień.
- Martwy obszar wokół zera uniknięty poprzez mechaniczny "dither" (2 x 500 THz oscylator z 1 Hz różnicą dla 1 deg/h!); 400 nm oraz 750nm odpowiada 700 THz oraz 400 THz
- Zwiększona żywotność (5 - 7 lat) ~ mechaniczne żyro, wciąż ograniczona przez wypalanie elektrod oraz ulatnianie się helu.
- ▶ Interferometr pierścieniowy z pętlą SMF (0.1 - 10 km na średnicy 3-30 cm, czyli $S= 0.7-700 \text{ m}^2$).
- ▶ Elementy na ciele stałym wywodzące się z telekomunikacji światłowodowej: nisko-stratne SMF oraz dioda laserowa, EDAF, zintegrowany obwód optyczny, elementy światłowodowe (sprzęgacz, izolator, cyrkulator, FBG...)
- ▶ Znacznie dłuższa żywotność.
- ▶ Niska moc, niskie napięcie.
- ▶ Brak szumu akustycznego

Na podstawie wykładu
LeFavre, EWOFS-5
Kraków, 2013

INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS



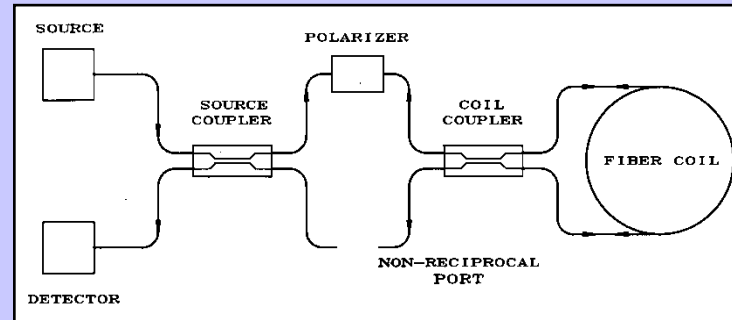
FOG - odwracalność

$$\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega = \frac{2\pi * 1000[m] * 0.1[m]}{0.000001[m] * 3000000000[m/s]} 1[\text{deg}/h] = \frac{628}{300[1/s]} \frac{1[\text{deg}]}{3600[s]} =$$
$$= \frac{2.09}{3600} [\pi/180] = \frac{2\pi}{648000} = 1.6[pm] - \text{czyli ok. } 1/100 \text{ średnicy atomu wodoru!!!}$$

- Odwracalność: rozwiązaniu równania falowego odpowiada jedno rozwiązanie z dokładnie określoną prędkością i tłumieniem z którego otrzymamy tą samą postać równania falowego
- W wolnej przestrzeni jest nieskończenie wiele rozwiązań: wymagających dopasowania do "istniejących" 2 przeciwległych rozwiązań odwracalnych.
- W strukturze prowadzącej (falowodzie): istnieją dyskretne rozwiązania, tzw. "mody".
- W falowodzie jednomodowym: istnieje jedno unikalne rozwiązanie (mod).
- Odwracalność + jedno-modowa propagacja: dwa przeciwległe rozwiązania są unikalne i odwracalne.
- Laser w wolnej przestrzeni ma także mody, zaś filtracja także może dostarczyć jednomodowego działania. Dla RLG - selekcja pojedynczego modu przestrzennego za pomocą pinhola oraz odpowiednia wnęka zapewniająca pojedynczy mod podłużny (wzmocnienie dla He-Ne z szerokością 1 GHz podczas gdy zakres widmowy dla 30 cm wnęki jest także 1 GHz). Jednakże w odróżnieniu od FOG trudno jest zmieniać czułość RLG dowolnie w górę lub dół, gdyż zbyt długa wnęka to wiele modów podłużnych, zaś zbyt krótka nie zapewnia odpowiedniego wzmocnienia.

FOG a serendipidy

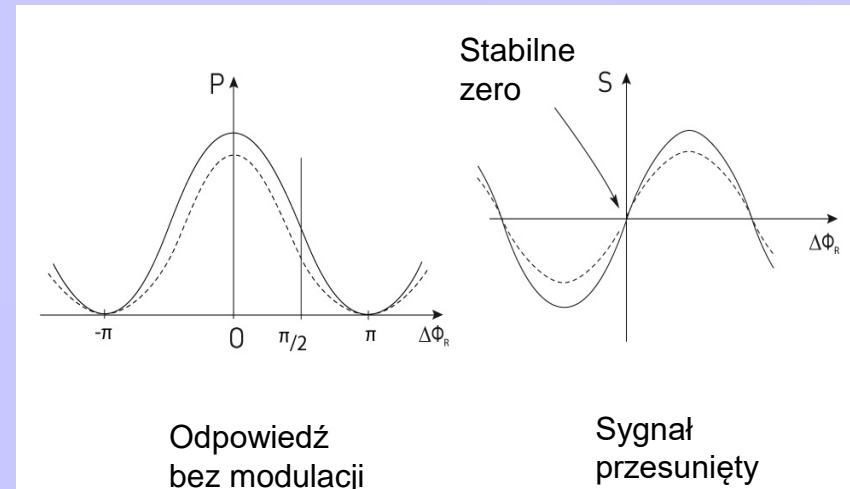
- I. Warunek odwracalności dla detekcji ϕ_s – konfiguracja odwracalna [Urlich, 1980] zwana także konfiguracją minimalną [Arditty & Lefevre, 1981]



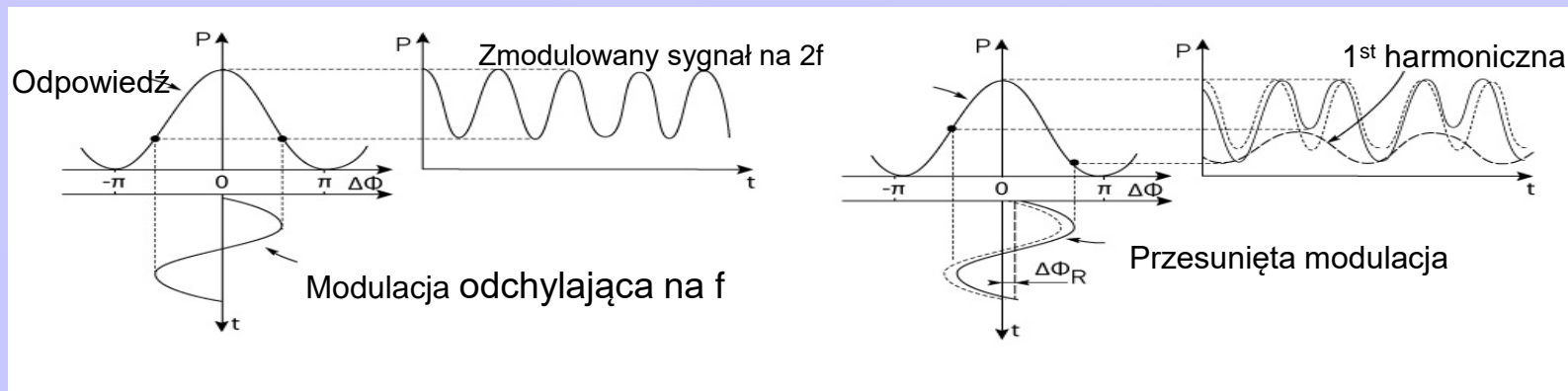
Połączenie pojedynczego modu przestrzennego oraz jednomodowej filtracji we wspólnej drodze WE-WY

- II. FOG używa jak każdy interferometr odpowiedzi typu <<cosinus>>

- Linia przerywana – zmiana mocy
- Potrzeba zamiany sygnału na sygnał typu (sinus), «wyśrodkowanego» wokół zera.

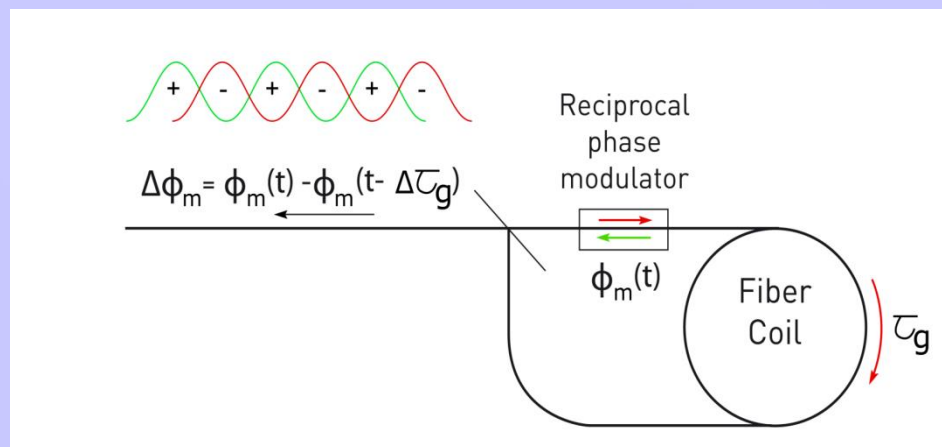


→ Zastosowanie odwracalnego MF (na końcu pętli) dla odchylenia sygnału do punktu maksymalnej czułości w zerze oraz



ostateczne działanie MF musi odgrywać rolę filtrującej linii opóźniającej, działanie na szczególnej częstotliwości [Bergh et al., 1981]:

- opóźnienie w pętli równe połowie okresu modulacji.
- dla «odpowiedniej» częstości (100 kHz.km, $\tau_g = 5 \mu\text{s}/\text{km}$) nieparzyste harmoniczne są maksymalne, wówczas DC ale TAKŻE parzyste harmoniczne są wygaszone (wracają w przeciwfazie).



III. FOG stosuje także szerokopasmowe źródło, bo:

- wszystkie nieliniowe efekty muszą być drastycznie zredukowane albowiem odwracalność bazuje na liniowości równania falowego. Prowadzenie fali w rdzeniu o stosunkowo małej średnicy daje wysoką gęstość mocy, zatem pojawia się nieliniowy efekt Kerra (rzędu 10^{-12} zmiana współczynnika załamania dla typowej mocy 1 mW w pętli, co jest ok. 7 rzędów powyżej spodziewanej zmiany wynikłej z efektu Sagnaca-Von Laue). Dla źródła szerokopasmowego gdzie rms wartość mocy równa jest średniej wartości mocy [Ezekiel et al., 1982] efekt Kerra jest uśredniony dając wkład poniżej wymaganej wartości pomiaru fazy.
- rozproszenie wsteczne od punktu środkowego pętli jest spójne dla fali cw i ccw, zatem dla typowej drogi koherencji źródła półprzewodnikowego rzędu 0.1 m i rozproszeniu wstecznym na poziomie $10^{-7}/\text{m}$, mamy zaburzenie mocy rzędu 10^{-11} co odpowiada stosunkowi amplitud $3 \cdot 10^{-6}$ – zatem daleko od nanoradiana. Dla odpowiednio dobranej częstotliwości modulacji, przy szerokopasmowym źródle, fazowa modulacja rozproszonych wstecznie fal od środka pętli jest zniwelowana. Dodatkowo źródło takie pozwala zniwelować niedoskonałość polaryzatora (wymagany poziom ekstynkcji > 180 dB) [Fredricks & Ulrich, 1984; Lefèvre et al., 1985a; Burns, 1986].

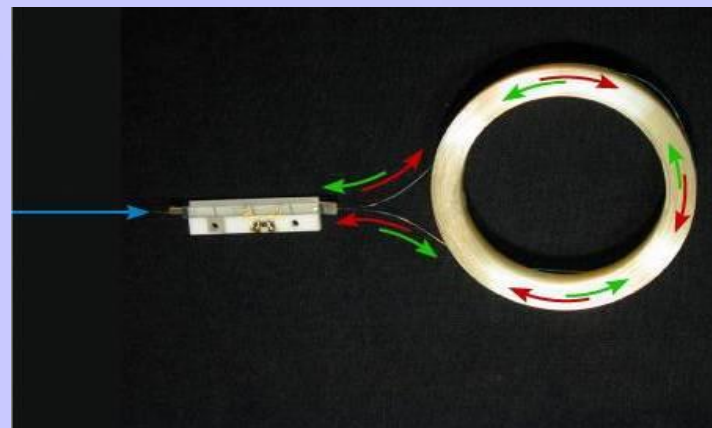
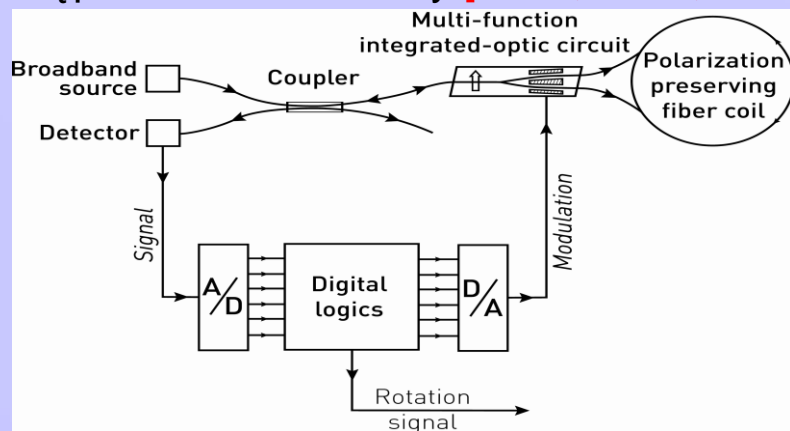
IV. Problem polaryzacji:

- ▶ Niska wartość długookresowego dryftu w FOG jest trudna do otrzymania ze względu na problemy polaryzacyjne. Jak wiadomo jedno-modowe włókno posiada dwa mody polaryzacyjne, zaś odwracalność wymaga by był tylko jeden.
- ▶ Filtrowanie polaryzacyjne we wspólnej drodze WE-WY jest obecnie wystarczającym zabiegiem ALE, dla spójnego źródła detekowane odchylenie zależy od poziomu ekstynkcji polaryzatora – wymagane -180 dB dla nanoradiana !
- ▶ Problem ten może być rozwiązany poprzez:
 - utrzymującą polaryzację pętlę światłowodową,
 - depolaryzację z źródłem szerokopasmowym wytworzoną poprzez wrodzoną wewnętrzną dwójłomność włókna,

Ale też poprzez “technologiczną serendipity”:

- high-rejection polarizer (single polarization proton-exchanged LiNbO₃ circuit),
- niespolaryzowane domieszkowane erbem ASE (Amplified “by stimulated emission” Spontaneous Emission) źródło włóknowe wzięte bezpośrednio z telekomunikacyjnego wzmacniacza (EDFAs).

V. Ostatecznie, dla uzyskania dużej liniowości współczynnika skali, FOG wykorzystują cyfrową pętlę sprzężenia zwrotnego ze skokową zmianą fazy [Lefèvre et al., 1985] stosującą odwracalny MF jako modulację przesuającą o $\pi/2$ i całkowicie cyfrowy schemat przetwarzania sygnału gdzie zmodulowany sygnał gyro jest próbkowany przez ADC a następnie demodulowany [Auch, 1986; Arditty et al., 1989].



- Zachowująca polaryzację pętla światłowodowa typowo o długości 100 m - 10 km
- Wielofunkcyjny zintegrowany obwód optyczny (MIOC - Multi-function Integrated-Optic Circuit) zawierający wytworzony na bazie litografii protonowej w LiNbO_3 jedno-polaryzacyjny falowod dostarczający bardzo wysoką wartość ekstynkcji dla polaryzatora.
- Y-rozgałęziacz oraz parę push-pull, niskonapięciowych, szeroko-częstotliwościowych modulatorów fazy
- Źródło szerokopasmowe: niespolaryzowane erbowe ASE źródło.
- Całkowicie cyfrową elektroniczną obróbkę sygnału.