

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **235842**
(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **418814**

(22) Data zgłoszenia: **26.09.2016**

(51) Int.Cl.
H01S 3/067 (2006.01)
H01S 3/07 (2006.01)
H01S 3/107 (2006.01)
H01S 3/10 (2006.01)
G02F 1/377 (2006.01)
G02B 6/126 (2006.01)
H04J 14/06 (2006.01)

(54) **Nasycalny absorber i sposób synchronizacji modów w laserze**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
09.04.2018 BUP 08/18

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
02.11.2020 WUP 17/20

(73) Uprawniony z patentu:
**INSTYTUT CHEMII FIZYCZNEJ POLSKIEJ
AKADEMII NAUK, Warszawa, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:
YURIY STEPANENKO, Warszawa, PL
JAN SZCZEPANEK, Chojne, PL
TOMASZ KARDAŚ, Warszawa, PL
MICHAŁ NEJBAUER, Dębe Wielkie, PL
CZESŁAW RADZEWICZ, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Joanna Dargiewicz

PL 235842 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest nasycalny absorber i sposób synchronizacji modów, zwłaszcza do zastosowania w ultraszybkich laserach światłowodowych wykonanych z wykorzystaniem światłowodów utrzymujących polaryzację (ang. Polarization Maintaining, PM).

Nasycalne absorbery wykorzystywane do stabilizacji trybu impulsowego we wnękach laserowych dzielą się na materiałowe oraz nie materiałowe. W tych pierwszych wykorzystywana jest własność nasycania się procesu optycznej absorpcji niektórych materiałów pod wpływem naświetlenia ich światłem laserowym o dużej intensywności. W przypadku, gdy stosowany jest materiałowy nasycalny absorber (w postaci warstwy materiału naniesionej na lustrze lub światłowodzie) straty dla promieniowania o niższej intensywności (pracy ciągłej) są większe niż dla promieniowania o wyższej intensywności (impulsów). W tej sytuacji impulsowy tryb pracy lasera – tożsamy z synchronizacją modów – jest preferowany. Niestety materiałowe nasycalne absorbery poddane działaniu promieniowania laserowego o dużej intensywności nie są trwałe i z czasem tracą swoje właściwości. W efekcie parametry lasera zmieniają się w czasie, a sam laser ostatecznie przestaje pracować. Drugim typem nasycalnych absorberów są absorbery nie materiałowe, oparte na fundamentalnych zjawiskach fizycznych takich jak interferencja światła oraz nieliniowa odpowiedź ośrodka dielektrycznego na pole elektryczne o dużej amplitudzie. Za przykład takich nasycalnych absorberów mogą służyć te wykorzystujące zjawisko nieliniowego obrotu polaryzacji [1] (ang. Nonlinear Polarization Evolution, NPE) lub bazujące na interferencji impulsów tak zwane nieliniowe lustro pętlowe [2] (ang. Nonlinear Optical Loop Mirror NOLM) oraz jego modyfikacja: NALM (ang. Nonlinear Amplifying Loop Mirror, NALM) [3].

Ze względu na odporność na czynniki zewnętrzne takie jak temperatura oraz wstrząsy mechaniczne w laserach światłowodowych korzystne jest zastosowanie światłowodów utrzymujących polaryzację (PM). Dotychczas w ultraszybkich całkowicie światłowodowych laserach zbudowanych wyłącznie w oparciu o światłowody PM z czasem trwania impulsu $< 1\text{ps}$ oraz liniowej lub pierścieniowej geometrii wnęki używane były materiałowe nasycalne absorbery oraz różne modyfikacje NOLM (NALM). Nieliniowy obrót polaryzacji w światłowodowych wnękach PM był uważany za niemożliwy, zwłaszcza w konfiguracjach z pierścieniowymi wnękami laserowymi. Główną przyczyną utrzymywania się tego poglądu jest obecność w światłowodach PM dużej dwójłomności, a co za tym idzie, dużego niedopasowania prędkości grupowych (ang. Group Velocity Mismatch, GVM) impulsów światła o polaryzacji „szybkiej” i, prostopadłej do niej, polaryzacji „wolnej”. Zjawisko to znane jest również jako efekt dyspersji modów polaryzacyjnych (ang. Polarization Mode Dispersion, PMD). Impuls o pewnej zadanej polaryzacji wnikając do światłowodu PM dzieli się na dwa przekrywające się w czasie impulsy (szybki i wolny). Te dwa impulsy o prostopadłych polaryzacjach poruszają się z różnymi prędkościami, przy dużej wartości GVM, szybko tracą przekrywanie czasowe. Obecność dwóch kopii impulsu podróżujących we wnęce jest natomiast niedopuszczalna, gdyż powoduje ona niestabilność procesu formowania się impulsu we wnęce.

Zasada działania nasycalnego absorbera opartego o NPE w światłowodzie nieutrzymującym polaryzacji przedstawiona została na fig. 1. Na fig. 1 (a) pokazana została propagacja światła o polaryzacji eliptycznej w izotropowym ośrodku dielektrycznym niewykazującym efektu Kerra (reżim małego natężenia światła, gdzie efekty nieliniowe mogą być zaniedbane). Każda składowa polaryzacji porusza się z taką samą prędkością fazową nie zmieniając stanu polaryzacji światła na wyjściu z dielektryka. W tej sytuacji, jeśli za światłowodem ustawiony zostanie polaryzator, intensywność światła na wyjściu z polaryzatora nie będzie zależała od intensywności padającego promieniowania.

Przypadek propagacji w ośrodku dielektrycznym z niezerową wartością nieliniowego (zależnego od intensywności) współczynnika załamania światła pokazana została na fig. 1 (b). Prędkość fazowa składowej polaryzacyjnej o większej intensywności będzie mniejsza wskutek efektu Kerra. Efektem różnicy prędkości fazowych będzie obrót stanu polaryzacji światła na wyjściu z dielektryka. Im większa intensywność światła na wejściu, tym większy obrót polaryzacji można uzyskać. Po włożeniu w tor wiązki światła na wyjściu dodatkowego polaryzatora uzyskuje się modulację intensywności zależną od natężenia światła na wejściu.

Przy bezpośredniej zamianie izotropowego ośrodka, którym jest zwykły jednomodowy światłowód telekomunikacyjny, na światłowód utrzymujący polaryzację i wykazujący dużą dwójłomność, mechanizm nasycalnej absorpcji w oparciu o NPE przestaje działać. Poza nieliniowym przesunięciem fazowym w światłowodach PM objawi się efekt GVM: światło poruszające się wzdłuż szybkiej oraz wolnej osi

światłowodu posiada różną prędkość grupową i na wyjściu ze światłowodu już nie tworzy jednego impulsu o polaryzacji eliptycznej, lecz dwa niezależne od siebie impulsy światła o polaryzacji liniowej (fig. 1c).

Próby realizacji PM NPE w liniowych wnękach laserowych pokazały ograniczenie tej metody do generacji wyłącznie impulsów spektralnie wąskopasmowych o czasie trwania od kilku do kilkudziesięciu pikosekund [4]–[7]. Na realizację femtosekundowego trybu pracy zostało nałożone ograniczenie dużej wartości GVM (PMD). W cytowanym, znanym rozwiązaniu, przed układem nasycalnego absorbera PM-NPE impuls porusza się w światłowodzie PM i ma liniową polaryzację, równoległą do jednej z osi (szybkiej lub wolnej) światłowodu. Układ NPE stanowi światłowód PM obrócony o pewien kąt α w stosunku do kierunku wejściowej polaryzacji (wymuszonej poprzedzającym układ NPE fragmentem światłowodu PM). W tej sytuacji wejściowy impuls rozkładany jest na dwie prostopadłe polaryzacje (odpowiednio wzdłuż osi szybkiej i wolnej światłowodu PM w układzie NPE). Stosunek podziału energii między dwa impulsy zależy od kąta α . Następnie, dwie składowe polaryzacyjne propagują się z różnymi prędkościami grupowymi w światłowodzie PM oddziałując ze sobą w sposób nieliniowy. Na wyjściu z układu NPE impulsy trafiają do następnego światłowodu PM z osią szybką równoległą do osi światłowodu ustawionego przed układem NPE.

Niespodziewanie okazało się, że podział światłowodu PM na pewną liczbę krótszych odcinków, z których pierwszy jest obrócony o pewien kąt α w stosunku do kierunku wejściowej polaryzacji (wymuszonego np.: przez światłowód PM poprzedzający układ NPE) a każdy kolejny obrócony jest o 90 stopni wokół osi światłowodu w stosunku do poprzedniego, pozwala w znacznej mierze skompensować efekt GVM.

Przedmiotem wynalazku jest nasycalny absorber, w szczególności do zastosowania w ultraszybkich laserach światłowodowych, charakteryzujący się tym, że zawiera światłowód utrzymujący polaryzację (PM) podzielony na odcinki, z których pierwszy odcinek ustawiony jest w taki sposób, że oś wolna pierwszego odcinka światłowodu obrócona jest względem kierunku polaryzacji impulsu wejściowego o kąt α , a każdy kolejny odcinek obrócony jest o 90 stopni wokół osi światłowodu w stosunku do poprzedniego odcinka, w taki sposób, że oś wolna każdego odcinka światłowodu jest prostopadła do osi wolnej sąsiedniego odcinka światłowodu, oraz polaryzator, którego kierunek polaryzacji obrócony jest względem osi wolnej ostatniego odcinka światłowodu o kąt α , przy czym kąt α dobrany jest eksperymentalnie od 0 do 45 stopni, tak aby laser pracował trybie impulsowym.

Korzystnie całkowita długość wszystkich odcinków obróconych o 90 stopni względem pierwszego odcinka jest równa całkowitej długości wszystkich pozostałych odcinków.

Korzystnie długość pierwszego i ostatniego odcinka jest krótsza, najkorzystniej dwa razy krótsza, od długości pozostałych odcinków wewnętrznych, najkorzystniej o równej długości.

Korzystnie jeden z odcinków światłowodu domieszkowany jest jonami aktywnymi, korzystnie erbium lub iterbium oraz przystosowany jest do oddzielnego pompowania dioda laserową.

Korzystnie nasycalny absorber zawiera środki do zawracania impulsu umieszczone za ostatnim odcinkiem światłowodu PM.

Korzystnie środki do zawracania impulsu obracają jego polaryzację.

Korzystnie środkami do zawracania impulsu jest lustro Faradaya albo lustro i ćwierćfalówka umieszczona pomiędzy lustrem a ostatnim odcinkiem światłowodu.

Przedmiotem wynalazku jest także sposób synchronizacji modów w laserze światłowodowym, polegający na tym, że jako nasycalny absorber stosuje się nasycalny absorber według wynalazku, przy czym korzystnie długość odcinków światłowodu oraz ich liczbę dobiera się tak, aby dla danej długości impulsu rozdzielone w światłowodzie impulsy stale częściami przekrywały się w czasie.

Wynalazek zostanie teraz omówiony z odniesieniem do rysunku, na którym poszczególne figury przedstawiają:

Fig. 1: Zjawisko nieliniowego obrotu polaryzacji w światłowodzie nie utrzymującym polaryzacji światła (a, b) w reżimie małego (a) i dużego natężenia światła (b). W reżimie dużego natężenia następuje obrót polaryzacji wywołany przesunięciem fazowym wynikającym z nieliniowości ośrodka (efekt Kerra). (c) – zjawisko rozdzielania impulsu o polaryzacji eliptycznej na dwa impulsy o prostopadłych polaryzacjach w światłowodzie utrzymującym polaryzację.

Fig. 2: przedstawia przykładowe schematy realizacji nieliniowego obrotu polaryzacji w światłowodach PM. (a): przypadek najprostszy: podział światłowodu PM na dwa równe odcinki pozwala na kompensację GVM. W pierwszym odcinku impuls o polaryzacji poziomej wyprzedza impuls o polaryzacji pionowej, w drugim (obróconym) odcinku impuls o pola-

ryzacji pionowej dogania impuls o polaryzacji poziomej co pozwala na złożenie obu impulsów w jeden. (b, c, d): korzystne schematy, gdzie poza kompensacją GVM uzyskuje się symetryzację widma i czasowego profilu impulsu. W tych schematach pierwszy i ostatni odcinek światłowodu jest krótszy (przy czym suma długości krótkich odcinków jest równa długości odcinka dłuższego), dzięki czemu w każdym kolejnym z odcinków zmienia się impuls wyprzedzający, (d) schemat dwuprzeciowy tożsamy ze schematem (c) gdzie impulsy zawracane są przy pomocy obracającego polaryzatora lustra Faradaya (FM). W przypadku przedstawionym na rysunku (d) długości odcinków są równe sobie. W ten sposób impuls (oznaczony na rysunku wzorem w kratkę) mający w górnej części rysunku polaryzację pionową powraca przez te same fragmenty światłowodu jako impuls o polaryzacji poziomej. Ten schemat pozwala w sposób automatyczny spełnić wymóg wyrównania dróg optycznych obu impulsów.

Fig. 3: Teoretyczne przebiegi czasowe (z lewej) oraz widma (z prawej) impulsów laserowych po przejściu przez układ dwóch (górną), trzech (środkową) i jedenastu odcinków (dół) o takiej samej sumarycznej długości (2 m). Rozciągnięty impuls o polaryzacji liniowej, profilu Gaussowskim, czas trwania 3.3 ps (200 fs skompresowany) i energii 6.5 nJ wpuszczony został do układu odcinków światłowodów PM pod kątem zapewniającym podział impulsu na dwa impulsy o prostopadłych polaryzacjach w stosunku energii 30:70. Za układem pod takim samym kątem ustawiony został polaryzator. Przebiegi dla dwóch polaryzacji rozdzielonych polaryzatorem oznaczono odpowiednio liniami, ciągłą oraz przerywaną. W przypadku pierwszym zastosowano dwa odcinki o równych długościach (1 m) w drugim i trzecim pierwszy i ostatni odcinek są 2 razy krótsze od pozostałych. W dwóch ostatnich przypadkach obserwowana jest dodatkowa, korzyść – symetryzacja widma i profilu czasowego impulsu.

Fig. 4: Układ zrealizowanego eksperymentalnie układu lasera ultraszybkiego (a). Korzystny schemat układu lasera ultraszybkiego (b), w którym nie wymagana jest duża dokładność dobrania długości odcinków światłowodu. WDM – sprzęgacz spektralny, YDF – światłowód domieszkowany iterbem, ISO – izolator optyczny, CIR – cyrkulator, POL – polaryzator, FM – lustro Faradaya, OC – sprzęgacz światłowodowy, FLT – spektralny filtr pasmoprzepustowy, PD – pompująca dioda laserowa.

Fig. 5: Eksperymentalne widmo lasera (czarna krzywa) całkowicie światłowodowego, zrealizowanego według schematu przedstawionego na rys. 4a. Przerywana krzywa przedstawia odzyskaną metodą SPIDER fazę spektralną impulsu laserowego po rekompresji w kompresorze siatkowym.

Fig. 6: Widmo RF całkowicie światłowodowego oscylatora laserowego, zrealizowanego według schematu przedstawionego na fig. 4a.

Podział światłowodu PM na krótsze odcinki, z których każdy kolejny obrócony jest o 90 stopni wokół osi światłowodu pozwala w znacznej mierze skompensować efekt GVM. W tej sytuacji kierunek osi „szybkich” odcinków o numerach $2n+1$ (pierwszego, trzeciego, piątego i następnych o ile występują) są do siebie równoległe i jednocześnie są prostopadłe do kierunków osi „szybkich” odcinków o numerach $2n$ (drugiego, czwartego etc.). Najlepszą kompensację efektu GVM uzyskuje się, gdy całkowita długość wszystkich odcinków o numerach $2n+1$ jest równa całkowitej długości wszystkich pozostałych odcinków (to jest – o numerach $2n$). Na dodatek, w takiej konfiguracji, światłowód nadal posiada własności światłowodów utrzymujących polaryzację. Jednocześnie ta modyfikacja otwiera możliwość realizacji mechanizmu nasycalnej absorpcji opartej o NPE w światłowodach PM (fig. 2a).

Impuls o polaryzacji eliptycznej wchodzący do układu odcinków rozkładany jest na dwa impulsy o prostopadłych do siebie polaryzacjach. W przypadku, gdy liczba odcinków jest większa od dwóch oraz długości pierwszego i ostatniego odcinka dobrane zostaną jako krótsze od pozostałych (np.: dwa razy krótsze od odcinków wewnętrznych) uzyskuje się dodatkową korzyść. W tej sytuacji w każdym kolejnym z odcinków zmienia się impuls prowadzący (wyprzedzający) co prowadzi do symetryzacji widma i czasowego profilu impulsu. Fig. 2 (b) i (c) przedstawiają korzystne schematy podziału, fig 3. przedstawia obliczone profile czasowe i widmowe impulsów rozdzielonych przy pomocy polaryzatora umieszczonego za układem dwóch (fig. 2(a)), trzech (fig. 2(b)) i jedenastu odcinków o takiej samej sumarycznej długości. Dalszy podział światłowodu na jeszcze mniejsze odcinki powoduje kolejne zmniejszenie efektu GVM (PMD). Dla krótkich impulsów preferowane jest użycie większej liczby odcinków – tak by rozdzielone impulsy stale częściami przekrywały się w czasie i w ten sposób wzmacniały efekt obrotu polaryzacji.

Zrównanie całkowitej długości wszystkich odcinków o numerach $2n+1$ i całkowitej długości wszystkich pozostałych odcinków (o numerach $2n$) powoduje całkowite zniesienie GVM. Bardzo dokładne wyrównanie tych długości jest również krytyczne z punktu widzenia różnicy prędkości fazowej dwóch modów polaryzacyjnych. W przypadku, gdy długości nie są sobie równe, nadatek długości odcinka światłowodu działa jak płytka falowa, co powoduje (potencjalnie niechciany) dodatkowy obrót polaryzacji. W tej sytuacji korzystny okazuje się schemat z fig. 2 (c), który można również zrealizować w dwuprzebiegowej liniowej konfiguracji z użyciem lustra Faradaya lub ćwierćfalówki z osią ustawioną pod kątem 45 stopni w stosunku do osi światłowodu PM i lustra (fig. 2(d), fig. 4(b)). W tej sytuacji impulsy przy odbiciu od lustra zamieniają się polaryzacjami. Każdy z impulsów przechodzi dwa razy przez każdy z odcinków światłowodu, przy drugim przejściu impulsy mają jednak zamienione polaryzacje. W efekcie każdy z odcinków światłowodu pełni w procesie podwójną rolę, co zapewnia automatyczne wyrównanie przebytej długości światłowodów.

Korzystna jest zamiana jednego z krótszych odcinków światłowodu PM na domieszkowany jonami aktywnymi (przykładowo erb Er, iterb Yb) oraz oddzielne pompowanie takiego odcinka diodą laserową. Takie rozwiązanie pozwala na bardziej swobodne ustalanie punktu pracy nasycalnego absorbera.

Przy zastosowaniu wyżej opisanego PM NPE nasycalnego absorbera w całkowicie światłowodowym laserze femtosekundowym udało się zademonstrować stabilnie działającą wnękę laserową produkującą ultrakrótkie impulsy laserowe. Na fig. 4 (a) przedstawiony został eksperymentalny schemat całkowicie światłowodowej pierścieniowej wnęki laserowej zbudowanej całkowicie ze światłowodów PM oraz używającej efektu PM NPE jako mechanizmu nasycalnej absorpcji. Fig. 5 i 6 przedstawiają odpowiednio odzyskany profil widmowy i fazę impulsu pochodzącego z eksperymentalnie zrealizowanej konfiguracji lasera oraz widmo RF lasera.

Zastrzeżenia patentowe

1. Nasycalny absorber, w szczególności do zastosowania w ultraszybkich laserach światłowodowych, **znamienny tym**, że zawiera:
światłowód utrzymujący polaryzację (PM) podzielony na odcinki, z których pierwszy odcinek ustawiony jest w taki sposób, że oś wolna pierwszego odcinka światłowodu obrocona jest względem kierunku polaryzacji impulsu wejściowego o kąt α , a każdy kolejny odcinek obrocony jest o 90 stopni wokół osi światłowodu w stosunku do poprzedniego odcinka, w taki sposób, że oś wolna każdego odcinka światłowodu jest prostopadła do osi wolnej sąsiedniego odcinka światłowodu, oraz polaryzator, którego kierunek polaryzacji obrocony jest względem osi wolnej ostatniego odcinka światłowodu o kąt α ,
przy czym kąt α dobrany jest eksperymentalnie od 0 do 45 stopni, tak aby laser pracował trybie impulsowym.
2. Nasycalny absorber według zastrz. 1, **znamienny tym**, że całkowita długość wszystkich odcinków obroconych o 90 stopni względem pierwszego odcinka jest równa całkowitej długości wszystkich pozostałych odcinków.
3. Nasycalny absorber według zastrz. 1 albo 2, **znamienny tym**, że długość pierwszego i ostatniego odcinka jest krótsza, korzystnie dwa razy krótsza, od długości pozostałych odcinków wewnętrznych, korzystnie o równej długości.
4. Nasycalny absorber według zastrz. 3, **znamienny tym**, że jeden z odcinków światłowodu domieszkowany jest jonami aktywnymi, korzystnie erbu lub iterbu.
5. Nasycalny absorber według dowolnego z poprzedzających zastrzeżeń, **znamienny tym**, że zawiera środki do zawracania impulsu umieszczone za ostatnim odcinkiem światłowodu PM.
6. Nasycalny absorber według zastrz. 5, **znamienny tym**, że środki do zawracania impulsu obracają jego polaryzację.
7. Nasycalny absorber według zastrz. 4 **znamienny tym**, że środkami do zawracania impulsu jest lustro Faradaya albo lustro i ćwierćfalówka umieszczona pomiędzy lustrem a ostatnim odcinkiem światłowodu.
8. Sposób synchronizacji modów w laserze światłowodowym, **znamienny tym**, że impuls o liniowej albo eliptycznej polaryzacji wprowadza się pod kątem do wyróżnionych osi ośrodków dwójtłomnego, na przykład takiego jak światłowód PM, podzielonego na odcinki, z których

każdy posiada wyróżnione osie dwójłomności obrócone o 90 stopni w stosunku do odcinka go poprzedzającego, sumaryczna długość odcinków o ortogonalnie obróconych osiach dwójłomności musi być taka sama, podczas propagacji wymieniony impuls rozkłada się na dwa impulsy o prostopadłych do siebie polaryzacjach zgodnie z szybką i wolną osią światłowodu i propaguje się z różnymi prędkościami grupowymi oraz różnymi prędkościami fazowymi, które są zależne od natężenia impulsu, a następnie po opuszczeniu ośrodka dwójłomnego impuls filtruje się na elemencie polaryzacyjnym, gdzie nieliniowe oddziaływanie promieniowania prowadzi do synchronizacji modów.

9. Sposób synchronizacji modów według zastrz. 8, **znamienny tym**, że impuls o liniowej albo eliptycznej polaryzacji wprowadza się pod kątem do wyróżnionych osi ośrodka dwójłomnego, na przykład takiego jak światłowód PM, podzielonego na odcinki tak, że pierwszy i ostatni odcinek światłowodu jest krótszy, korzystnie dwa razy krótszy niż odcinki pomiędzy nimi, które są korzystnie tej samej długości.
10. Sposób synchronizacji modów według zastrz. 8 albo 9, **znamienny tym**, że impuls o liniowej albo eliptycznej polaryzacji wprowadza się pod kątem do wyróżnionych osi ośrodka dwójłomnego, na przykład takiego jak światłowód PM, podzielonego na odcinki, których długość i liczbę dobiera się tak, aby dla danego czasu trwania impulsu, którego natężenie dzieli się na dwie prostopadłe polaryzacje, części impulsu sprzężone do osi ortogonalnych poruszające się z różnymi prędkościami, stale podczas całej propagacji przekrywały się w czasie częściami o niezerowej intensywności.

Rysunki

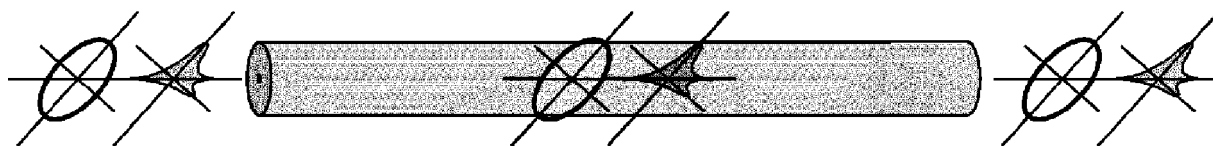


Fig. 1 (a)

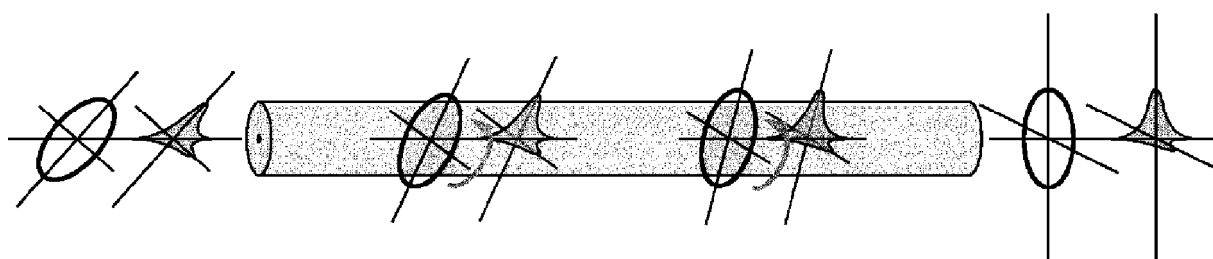


Fig. 1 (b)

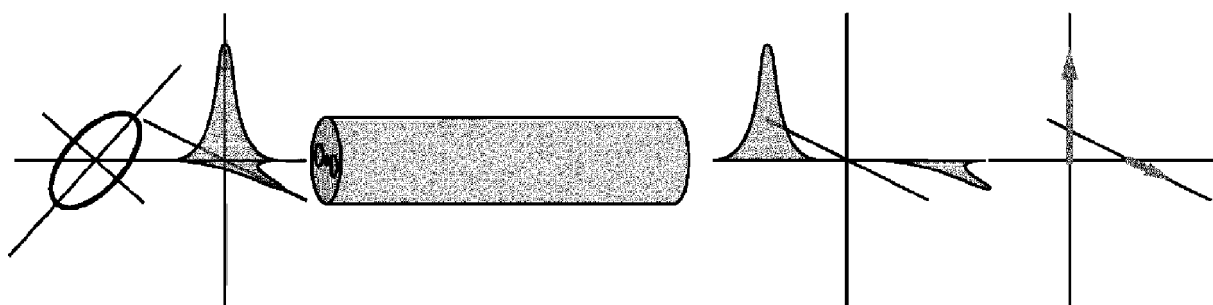


Fig. 1 (c)

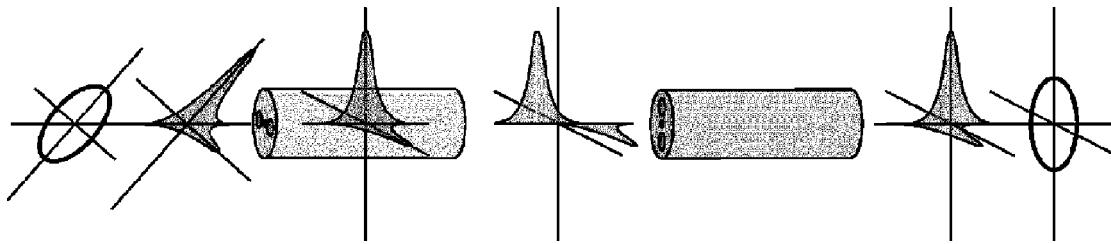


Fig. 2 (a)

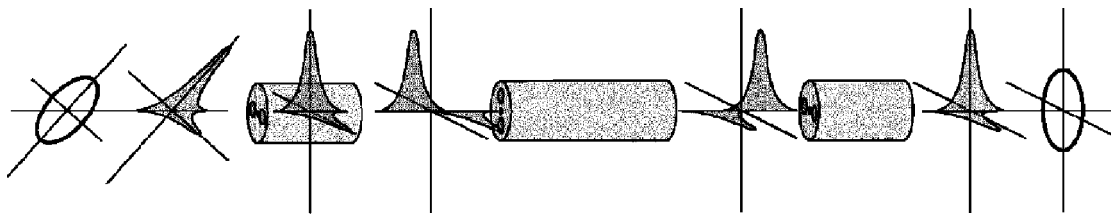


Fig. 2 (b)

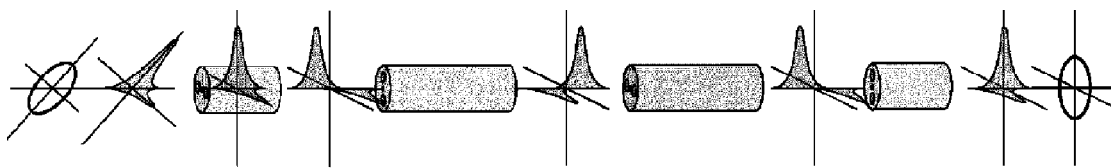


Fig. 2 (c)

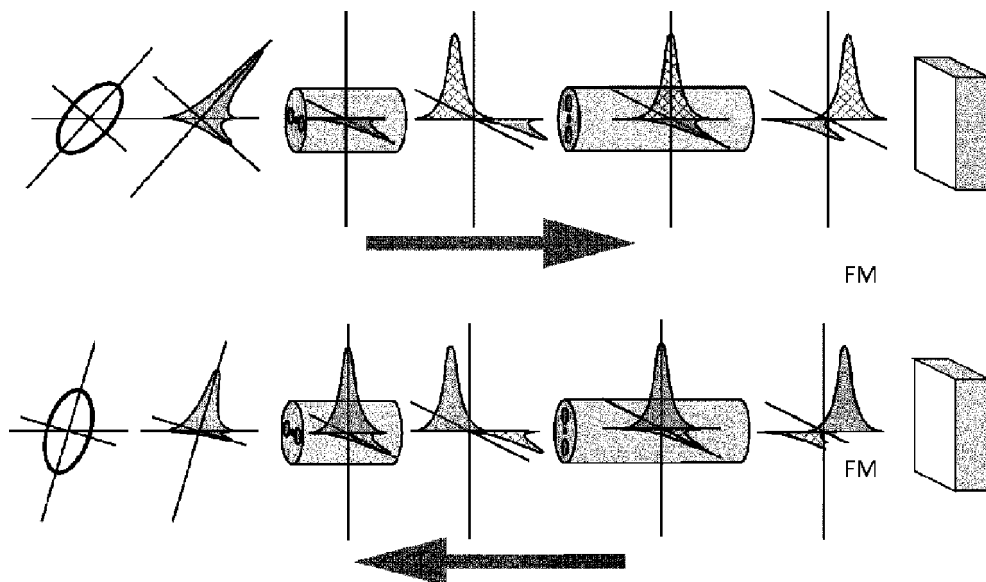


Fig. 2 (d)

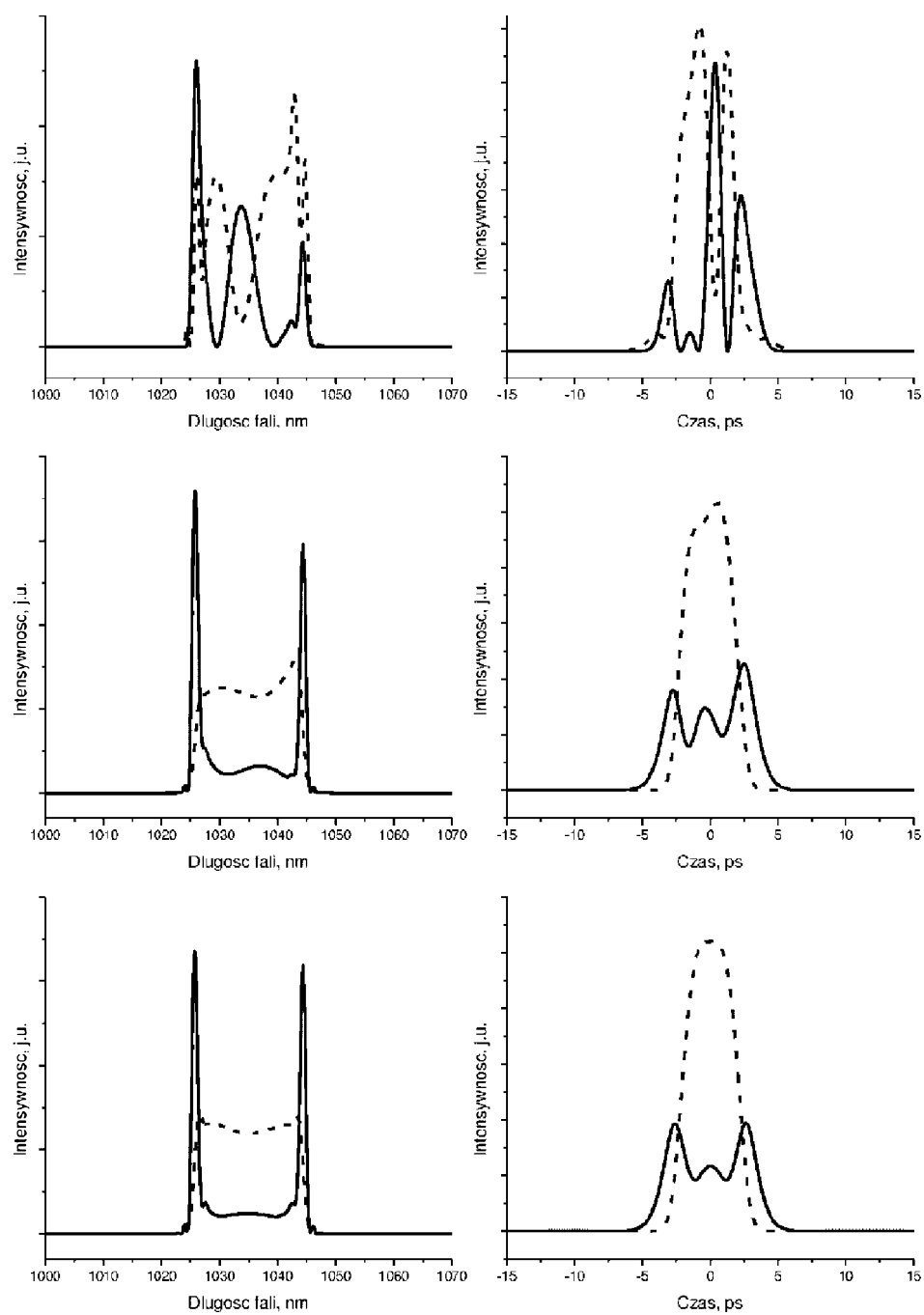


Fig. 3

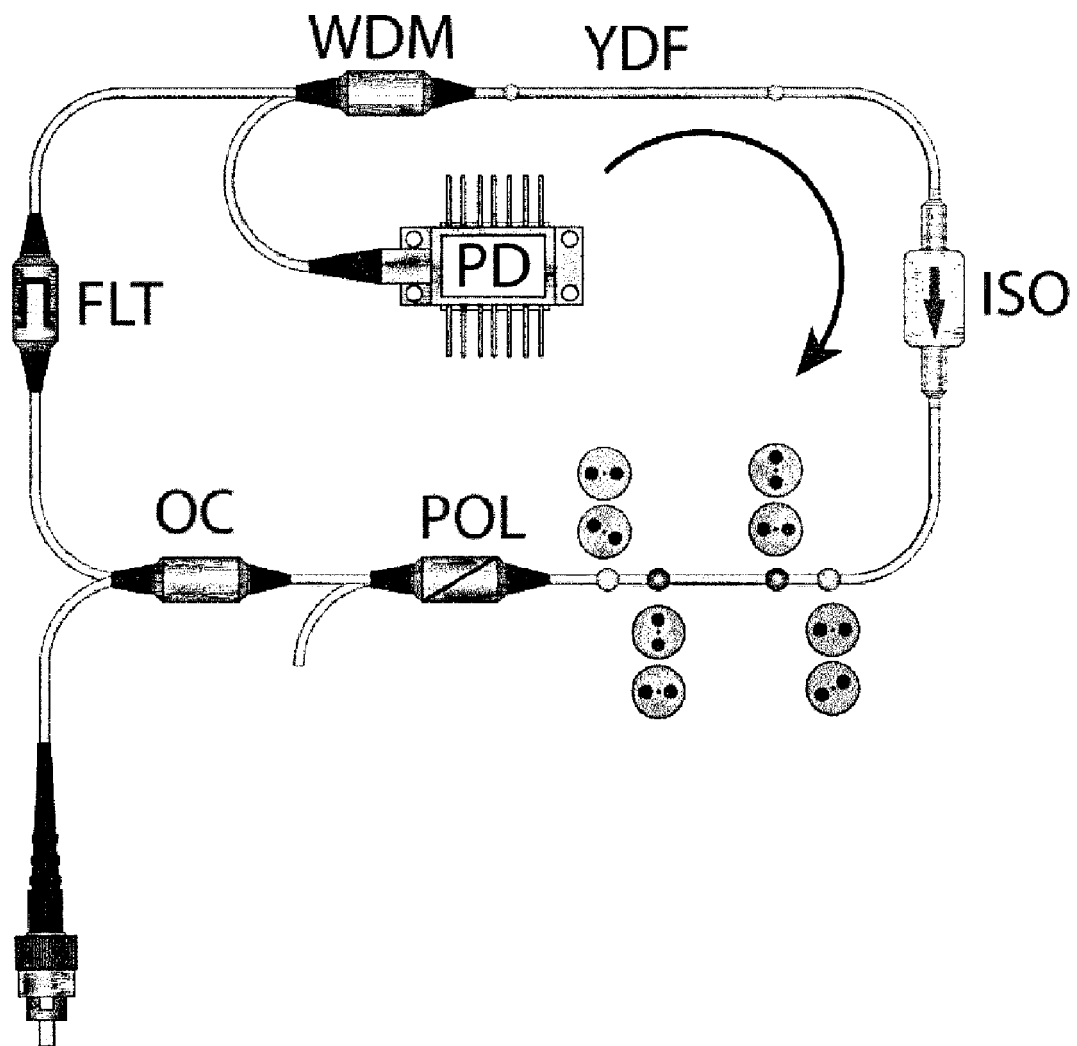


Fig. 4 (a)

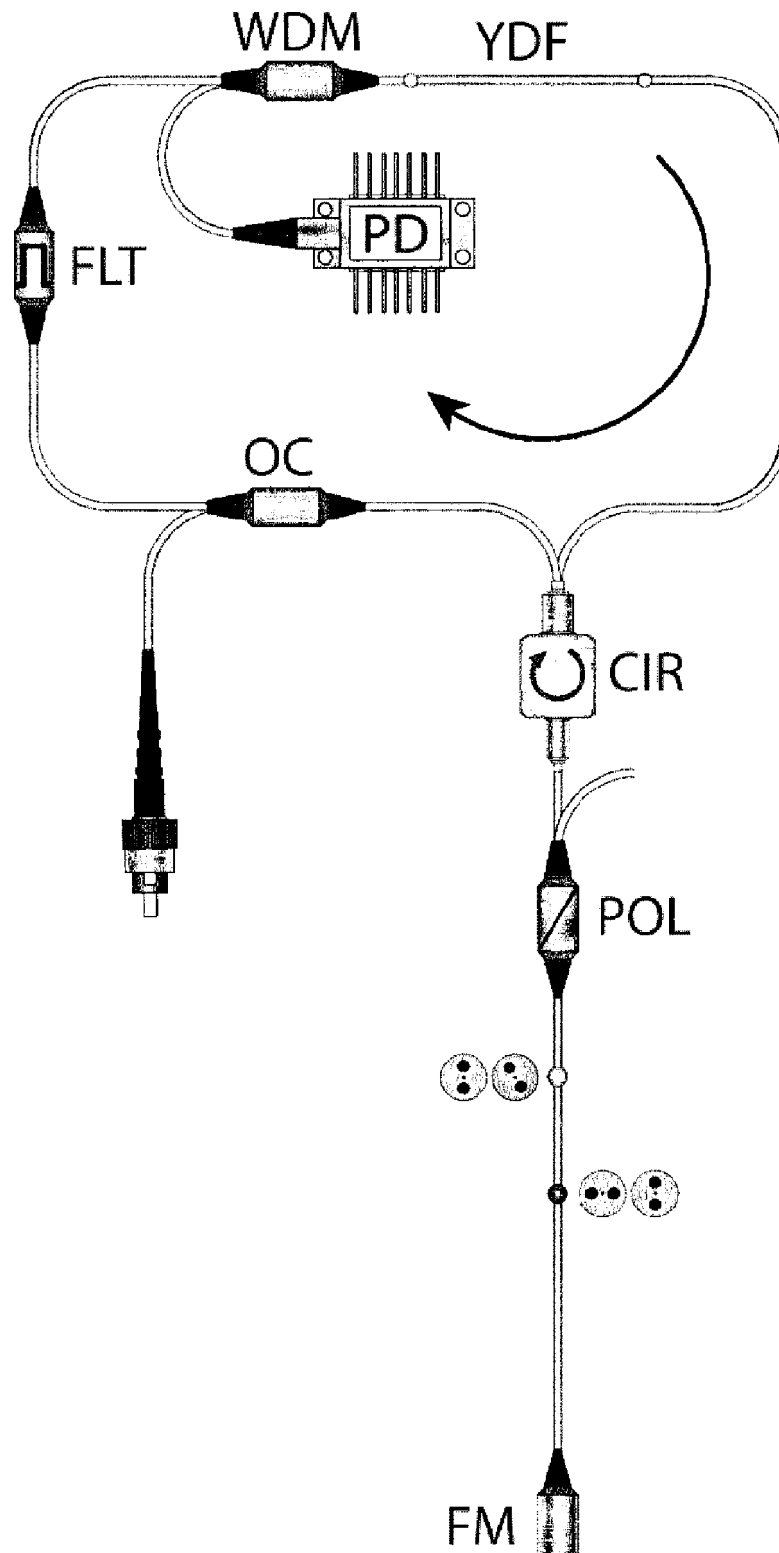


Fig. 4 (b)

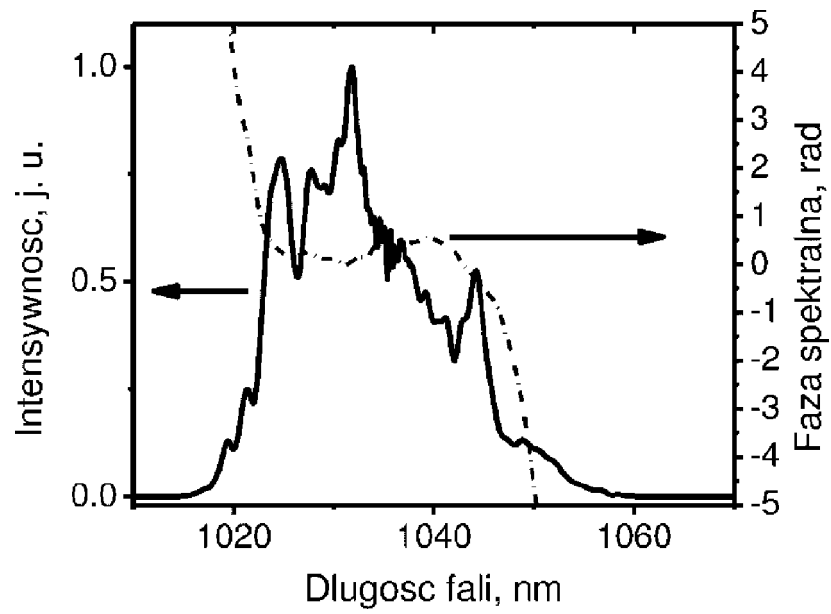


Fig. 5

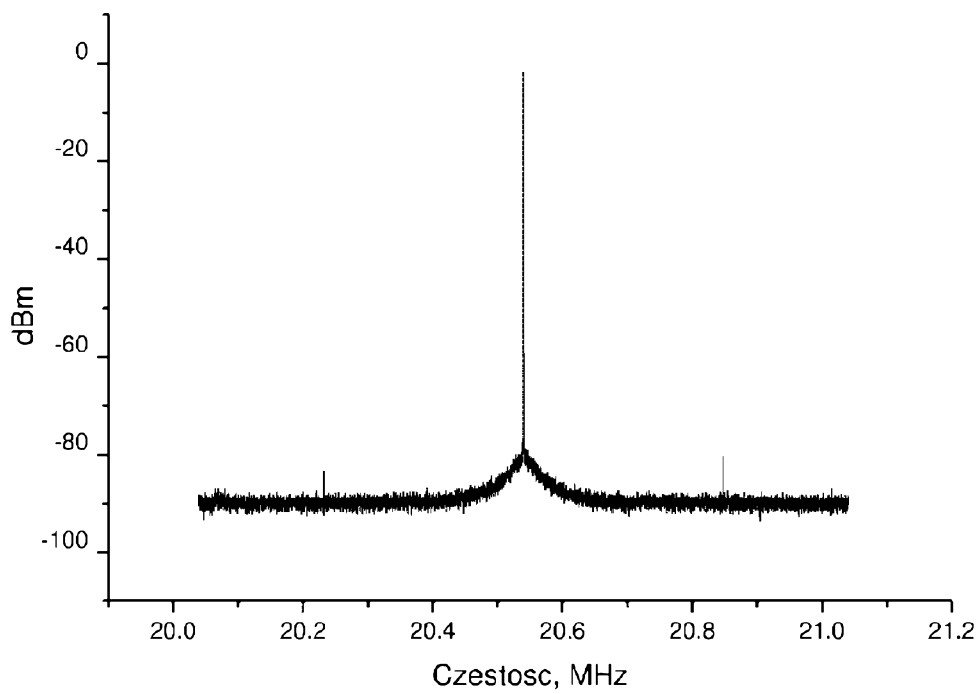


Fig. 6