

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

特許第3390755号

(P 3 3 9 0 7 5 5)

(45) 発行日 平成15年 3月31日 (2003.3.31)

(24) 登録日 平成15年 1月17日 (2003.1.17)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

G02F 1/35

G02F 1/35

請求項の数23 (全12頁)

(21) 出願番号 特願平10 - 275604

(22) 出願日 平成10年 9月29日 (1998.9.29)

(65) 公開番号 特開2000 - 105394 (P 2000 - 105394 A)

(43) 公開日 平成12年 4月11日 (2000.4.11)

審査請求日 平成12年10月23日 (2000.10.23)

(73) 特許権者 396020800

科学技術振興事業団

埼玉県川口市本町 4丁目 1番 8号

(72) 発明者 後藤 俊夫

愛知県日進市五色園 3 - 2110

(72) 発明者 西澤 典彦

愛知県名古屋市熱田区大宝 2 - 4 - 43

白鳥住宅 5 - 34

(74) 代理人 100089635

弁理士 清水 守

審査官 佐藤 宙子

(56) 参考文献 特開 平 8 - 146474 (J P , A)

OPTICS LETTERS , 1986
年 , V o l 11 , N o . 10 , 659 - 661

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 波長可変短パルス光発生装置及び方法

1

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 (a) 短パルス光源と、

(b) 該短パルス光源からの光の特性を調整する光特性調整器と、

(c) 該光特性調整器から入射パルスが入射されるとともに、出力パルスの波長を入射パルスの光強度に対し広帯域に線形に変化させる光ファイバとを具備することを特徴とする波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 2】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光特性調整器が光強度調整器である

波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 3】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がフェムト秒ファイバ

レーザである波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 4】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生

2

装置において、前記短パルス光源がピコ秒ファイバレーザである波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 5】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光ファイバが定偏波ファイバである波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 6】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、他の波長の短パルス光を生成するために前記光ファイバに接続される非線形結晶を備えることを特徴とする波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 7】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、生成されるパルス光の波長を更に変換するために、四光波混合手段を具備する波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 8】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光ファイバによって生成されたパル

10

ス光を増幅する光増幅器を具備する波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 9】 請求項 1 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記出力パルスが理想的なソリトンパルスである波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 10】 請求項 2 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光強度調整器を電氣的に調整し、パルス光の波長を制御する手段を具備する波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 11】 (a) 短パルス光源と、
(b) 該短パルス光源からの光強度を調整する光強度調整器と、

(c) 該光強度調整器から入射パルスが入射されるとともに、出力パルスの波長を入射パルスの光強度に対し広帯域に線形に変化させる光ファイバとを備え、

(d) 可搬型に組み立てることを特徴とする波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 12】 請求項 11 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がフェムト秒ファイバレーザである波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 13】 請求項 11 記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がピコ秒ファイバレーザである波長可変短パルス光発生装置。

【請求項 14】 短パルス光源からの光強度を調整し、前記短パルスを光ファイバへ入射することによって波長を入射パルスの光強度に対し広帯域に線形に変化させた出力パルスを発生させることを特徴とする波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 15】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記光ファイバの長さを変化させることによって、生成されるパルス光の波長を変化させる波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 16】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記出力パルスを非線形結晶に通し、他の波長の短パルス光を生成する波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 17】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、四光波混合によって、生成されるパルス光の波長を更に変換する波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 18】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記光ファイバによって生成されたパルス光を光増幅器を用いて増幅する波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 19】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記出力パルスとして理想的なソリトンパルスを発生させる波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 20】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記光強度調整器を電氣的に調整し、パルス光の波長を制御する波長可変短パルス光発生

方法。

【請求項 21】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、入射パルスの時間波形やスペクトル幅を変化させることによって、ソリトンパルスのパルス幅やスペクトル幅、及び中心波長を変化させる波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 22】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、入射パルスの偏光方向を調整することにより、ソリトンパルスの波長やスペクトルを調整する波長可変短パルス光発生方法。

【請求項 23】 請求項 14 記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記出力パルスとして、長波長側に生成されるソリトンパルスと共に、短波長側に生成される反ストークスパルスを生成する波長可変短パルス光発生方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長可変短パルス光発生装置及び方法に係り、特に、波長可変なフェムト秒台の短パルス光を発生させる装置及び方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】これまで、波長可変なフェムト秒パルス光の生成は、色素レーザーや固体レーザーにおいて実現されてきた。しかし、これらのレーザーは多くの光学素子を必要とする大がかりな装置で、波長の調整や安定な動作を得るためには、光学系の精密な調整が必要であり、波長の可変範囲も数十 nm とあまり広くなかった。

【0003】近年、光ファイバで構成されるコンパクトな短パルスレーザーが実現されてきた。しかし、特開平 10 - 213827 号公報に開示されているように、これまでの技術開発では如何に短いパルス光を如何に高強度で取り出すかについて主眼が置かれ、出力されるパルス光の波長を変化させることはあまりできなかった。

【0004】これまで、光ファイバに短パルス光を入射すると、長波長側に新たなパルスが生成されることが、P. Beaudra によって見出された〔IEEE J. Quantum Electron., QE - 23, p 1938 (1987)〕。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、P. Beaudra の報告では、パルス光の波長の可変性は議論されていなかった。また、通常の非定偏波ファイバが用いられていたため、出力は時間的に安定ではなく、得られるスペクトルもあまり綺麗ではなかった。更に、新たに生成されるパルス光へのエネルギーの変換効率も約 45% とあまり良くなかった。

【0006】また、近年、非線形結晶を用いたパラメトリック変換が、光の波長を変換する技術として注目を集めているが、この手法では、大きな励起光強度が必要で

あり、更に、波長を変化させるためには結晶やミラーなどの光学素子を調整することが必要で、装置の取り扱いはあまり簡便ではなかった。

【 0 0 0 7 】本発明は、上記問題点を除去し、光学系の調整をすることなく波長を変化させることができ、理想的なフェムト秒のソリトンパルスを生成するコンパクトな波長可変短パルス光発生装置及び方法を提供することを目的とする。

【 0 0 0 8 】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記目的を達成するために、

〔 1 〕波長可変短パルス光発生装置において、短パルス光源と、この短パルス光源からの光の特性を調整する光特性調整器と、この光特性調整器から入射パルスが入射されるとともに、出力パルスの波長を入射パルスの光強度に対し広帯域に線形に変化させる光ファイバとを具備するようにしたものである。

【 0 0 0 9 〕〔 2 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光特性調整器が光強度調整器である。

【 0 0 1 0 〕〔 3 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がフェムト秒ファイバレーザである。

【 0 0 1 1 〕〔 4 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がピコ秒ファイバレーザである。

【 0 0 1 2 〕〔 5 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光ファイバが定偏波ファイバである。

【 0 0 1 3 〕〔 6 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、他の波長の短パルス光を生成するために前記光ファイバに接続される非線形結晶を備えるようにしたものである。

【 0 0 1 4 〕〔 7 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、生成されるパルス光の波長を更に変換するために、四光波混合手段を具備するようにしたものである。

【 0 0 1 5 〕〔 8 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光ファイバによって生成されたパルス光を増幅する光増幅器を具備するようにしたものである。

【 0 0 1 6 〕〔 9 〕上記〔 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記出力パルスが理想的なソリトンパルスである。

【 0 0 1 7 〕〔 1 0 〕上記〔 2 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記光強度調整器を電氣的に調整し、パルス光の波長を制御する手段を具備するようにしたものである。

【 0 0 1 8 〕〔 1 1 〕波長可変短パルス光発生装置において、短パルス光源と、この短パルス光源からの光強度

を調整する光強度調整器と、この光強度調整器から入射パルスが入射されるとともに、出力パルスの波長を入射パルスの光強度に対し広帯域に線形に変化させる光ファイバとを備え、可搬型に組み立てるようにしたものである。

【 0 0 1 9 〕〔 1 2 〕上記〔 1 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がフェムト秒ファイバレーザである。

【 0 0 2 0 〕〔 1 3 〕上記〔 1 1 〕記載の波長可変短パルス光発生装置において、前記短パルス光源がピコ秒ファイバレーザである。

【 0 0 2 1 〕〔 1 4 〕波長可変短パルス光発生方法において、短パルス光源からの光強度を調整し、前記短パルスを光ファイバへ入射することによって波長を入射パルスの光強度に対し広帯域に線形に変化させた出力パルスを発生させるようにしたものである。

【 0 0 2 2 〕〔 1 5 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記光ファイバの長さを変化させることによって、生成されるパルス光の波長を変化させるようにしたものである。

【 0 0 2 3 〕〔 1 6 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記出力パルスを非線形結晶に通し、他の波長の短パルス光を生成するようにしたものである。

【 0 0 2 4 〕〔 1 7 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、四光波混合によって、生成されるパルス光の波長を更に変換するようにしたものである。

【 0 0 2 5 〕〔 1 8 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記光ファイバによって生成されたパルス光を光増幅器を用いて増幅するようにしたものである。

【 0 0 2 6 〕〔 1 9 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記出力パルスとして理想的なソリトンパルスを発生させるようにしたものである。

【 0 0 2 7 〕〔 2 0 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記光強度調整器を電氣的に調整し、パルス光の波長を制御するようにしたものである。

【 0 0 2 8 〕〔 2 1 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、入射パルスの時間波形やスペクトル幅を変化させることによって、ソリトンパルスのパルス幅やスペクトル幅、及び中心波長を変化させるようにしたものである。

【 0 0 2 9 〕〔 2 2 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、入射パルスの偏光方向を調整することにより、ソリトンパルスの波長やスペクトルを調整するようにしたものである。

【 0 0 3 0 〕〔 2 3 〕上記〔 1 4 〕記載の波長可変短パルス光発生方法において、前記出力パルスとして、長波

長側に生成されるソリトンパルスと共に、短波長側に生成される反ストークスパルスを生成するようにしたものである。

【 0 0 3 1 】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について詳細に説明する。

【 0 0 3 2 】まず、本発明の第 1 実施例について説明する。

【 0 0 3 3 】図 1 は本発明の第 1 実施例を示す波長可変短パルス光発生装置の模式図である。

【 0 0 3 4 】この図において、1 は短パルス光源、2 はこの短パルス光源 1 からの光特性を調整する光特性調整器、3 はこの光特性調整器 2 から入射パルスを入射するとともに、出力パルスの波長を線形に変化させることができる光ファイバ、R は励起パルス、S はソリトンパルスである。

【 0 0 3 5 】この図に示すように、励起光源には、例えば、フェムト秒パルス光を安定に生成するコンパクトな短パルス光源（ファイバレーザ）1 を用いる。その短パルス光源 1 の出力は、光特性調整器 2 を通し、パルス光を所望の光特性に調整した後、光ファイバ 3 に入射される。光ファイバ 3 の長さが十分に長く、入射光強度が十分に大きいとき、誘導ラマン散乱によって、入射パルスの長波長側に新たなパルス光が生成される。

【 0 0 3 6 】このパルス光は、自己位相変調と、波長分散の相互作用であるソリトン効果によって、パルス波形とスペクトル波形が sech^2 型をとる理想的なソリトンパルス S になっていく。このソリトンパルス S は光ファイバ 3 を伝搬するのに伴い、ラマン散乱効果によってスペクトルの中心が長波長側にシフトしていく。この効果をソリトン自己周波数シフトという。この時、周波数のシフト量は光ファイバ 3 の長さやパルス光の強度に依存するため、両者を変化させることにより、波長のシフト量を調整することができる。特に、入射光強度を変化させることで、波長シフト量を線形に変化させることができる。

【 0 0 3 7 】次いで、この波長可変短パルス光発生装置をより具体化した第 2 実施例について説明する。

(1) 機械的特性としては、

大きさ	レーザ本体	: 1 8 2 × 1 0 1 × 5 7 mm
	コントローラ	: 2 4 9 × 3 0 5 × 7 2 mm
重量	レーザ本体	: 3 . 0 kg
	コントローラ	: 2 . 8 kg

(2) 電気的特性としては、

消費電力 : 1 0 0 V 0 . 6 3 A max、平均 1 4 W、最大 2 2 W

(3) 光学的特性としては、

中心波長	: 1 5 5 9 nm
パルス幅	: 1 9 0 ~ 7 6 0 fs 可変、本実験では 1 9 0 fs で使用
繰り返し周波数	: 4 8 . 9 MHz
平均出力	: 1 1 . 1 mW (7 6 0 fs 時) ~ 3 6 . 1 mW (1 9 0

【 0 0 3 8 】図 2 は本発明の第 2 実施例を示す波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【 0 0 3 9 】この図において、1 1 はフェムト秒ファイバレーザ、1 2 はこのフェムト秒ファイバレーザ 1 1 からの光強度を調整する光強度調整器、1 3 はこの光強度調整器 1 2 から入射パルスを入射するとともに、出力パルスの波長を線形に変化させることができる定偏波光ファイバである。なお、1 4 は光スペクトル分析器、1 5 はパルス幅測定器、1 6 は光パワーメータであり、これらは、出力パルスを測定するために用いられるものであって、本発明の構成要件となるものではない。

【 0 0 4 0 】励起光源には、フェムト秒パルス光を安定に生成するコンパクトなフェムト秒ファイバレーザ 1 1 を用いる。フェムト秒ファイバレーザ 1 1 の出力は、光強度調整器 1 2 を通し、パルス光を所望の光強度に調整した後、定偏波光ファイバ 1 3 に入射される。この時、入射光の偏光方向は定偏波光ファイバ 1 3 の複屈折軸に平行に合わせる。定偏波光ファイバ 1 3 の長さが十分に長く、入射光強度が十分に大きいとき、誘導ラマン散乱によって、入射パルスの長波長側に新たなパルス光が生成される。

【 0 0 4 1 】このパルス光は、自己位相変調と、波長分散の相互作用であるソリトン効果によって、パルス波形とスペクトル波形が sech^2 型をとる理想的なソリトンパルス S になっていく。このソリトンパルス S は定偏波光ファイバ 1 3 を伝搬するのに伴い、ラマン散乱効果によってスペクトルの中心が長波長側にシフトしていく。この効果をソリトン自己周波数シフトという。この時、周波数のシフト量は定偏波光ファイバ 1 3 の長さやパルス光の強度に依存するため、両者を変化させることで、波長のシフト量を調整することができる。特に、入射光強度を変化させることにより、波長シフト量を線形に変化させることができる。

【 0 0 4 2 】本実施例において使用されるこの種のフェムト秒ファイバレーザ 1 1 としては、例えば、以下のようものが挙げられる。

【 0 0 4 3 】

f s 時)、本実験では 3 6 . 1 mW で使用

耐久性 : 半導体レーザーの寿命 2 年、交換可

また、使用したファイバの諸特性としては、

コア径 : 5 . 5 ± 0 . 5 μ m

光学的損失 : 2 . 6 d B / k m (1 5 5 0 n m の光に対し)

長さ : 1 1 0 m、7 5 m、4 0 m

である。

【 0 0 4 4 】 図 3 は本発明の第 2 実施例による光ファイバの出力におけるソリトンパルスのスペクトルの測定結果を示す図であり、7 5 m の光ファイバに 6 . 1 mW の

パルス光を入射したときに生成されたソリトンパルスのスペクトルの測定結果を示している。
【 0 0 4 5 】 この図に示すように、1 5 5 8 n m 付近に現れているのは、光ファイバに入射した励起パルス R のスペクトルである。この波長から長波長側に大きくシフトしたソリトンパルス S のスペクトルが 1 6 5 0 n m のところに現れており、スペクトル波形が綺麗な sech^2 型になっているのが分かる。スペクトル幅は約 1 6 n m であり、この時、パルス幅は 1 8 0 f s になっている。さらに、入射光強度を上げてスペクトルをシフトしても、スペクトルの形状は綺麗な sech^2 型を保った。

【 0 0 4 6 】 図 4 は本発明の第 2 実施例による光ファイバへの入射光強度に対するソリトンパルスのスペクトルの中心波長の変化を 4 0 m、7 5 m、1 1 0 m の光ファイバについて表している。

【 0 0 4 7 】 入射光強度を 2 mW よりも大きくすると、ソリトンパルスの中心波長が線形に増加していく。波長のシフト率は、ファイバ長が長いほど大きくなった。最大 1 5 0 n m 程度のスペクトルシフト (中心波長 1 7 1 0 n m) が 1 1 0 m、及び 7 5 m のファイバにおいて観測された。更に、入射光強度を大きくし、また、ファイバ長を長くすることによって、ソリトンパルスの波長を約 2 μ m 程度までシフトできる。

【 0 0 4 8 】 上記した波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置 (図 2 参照) から分かるように、この装置はコンパクトなファイバレーザーと数十 ~ 数百 m の光ファイバで構成されるため、装置全体が非常にコンパクトな可搬型になっている。つまり、光ファイバをファイバレーザーと一体化することにより、ポータブルなパルス光発生装置を実現することができる。また、入射光強度を変化させるだけで、ソリトンパルスの波長を線形に変化させることを実現できた。

【 0 0 4 9 】 図 5 は本発明の第 2 実施例による光ファイバ長とスペクトル幅、パルス幅の関係を表す図である。

【 0 0 5 0 】 この図から明らかなように、光ファイバ長が長くなるに従って、スペクトル幅は狭くなり、パルス幅は広がる傾向を見せた。ここで、光ファイバ長 4 0 ~ 1 1 0 m の範囲で、スペクトル幅は 1 8 ~ 1 5 n m、パルス幅は 1 5 5 ~ 1 9 5 f s と変化した。このように、

波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置 (図 2 参照) において用いる光ファイバの長さを変化させることによって、ソリトンパルスのパルス幅やスペクトル幅を変化させることができる。

【 0 0 5 1 】 図 6 は本発明の第 2 実施例を示すファイバ長と波長シフト量の関係を示す図である。

【 0 0 5 2 】 この図から明らかなように、光ファイバ長が長くなるほど波長のシフト量は単調に増加した。これは、パルス光が光ファイバを伝搬するほどソリトン自己周波数シフトによって波長が長波長側にシフトしていくためである。このように、光ファイバ長を変化させることによって、ソリトンパルスの波長を変化させることができる。

【 0 0 5 3 】 次に、本発明の第 3 実施例について説明する。

【 0 0 5 4 】 図 7 は本発明の第 3 実施例を示す波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。なお、図 2 における部分と同じ部分については同じ符号を付してそれらの説明は省略する。

【 0 0 5 5 】 第 2 実施例で示した波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の出力を非線形結晶 2 1 に通し、ソリトンパルスの第 2 高調波短パルス D を生成する実験について説明する。

【 0 0 5 6 】 図 7 に示すように、波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置において生成されるパルス光は、ピークパワーが数百 W あるため、非線形結晶 2 1 を用いることによって、第 2 高調波短パルス D を生成することができる。定偏波光ファイバ 1 3 からの出力光を K T P などの非線形結晶 2 1 に入射し、結晶の角度を調整することによって、1 5 5 0 ~ 2 0 0 0 n m のソリトンパルス S から 7 8 0 ~ 1 0 0 0 n m の波長の短パルス光を生成することができる。ソリトンパルス S の波長を変化させることによって、第 2 高調波短パルス D の波長を同様に変化させることができる。

【 0 0 5 7 】 図 8 は本発明の第 3 実施例による波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置を用いて生成された第 2 高調波の中心波長の入射光強度依存性を示す図であり、光ファイバは 4 0 m、7 5 m、1 1 0 m について示している。

【 0 0 5 8 】 入射光強度を変化させることによって、ソリトンパルスの波長が線形に変化するため、第 2 高調波短パルスの波長も、線形にシフトしていく。入射光強度が大きいほど、また、光ファイバ長が長いほどシフト量は大きくなる。

【 0 0 5 9 】次に、本発明の第 4 実施例について説明する。

【 0 0 6 0 】図 9 は本発明の第 4 実施例を示す四光波混合を用いたフェムト秒パルスの広帯域波長可変パルス発生装置の模式図である。

【 0 0 6 1 】図 9 に示すように、光ファイバ 3 3 に励起パルス R とともに、励起用半導体レーザー（励起用 LD）3 1 からの波長の異なる励起用レーザーをファイバカプラ等の結合器 3 2 を介して入射する。

【 0 0 6 2 】上述したように、励起パルス R によって長波長側にソリトンパルス S が生成されるが、このソリトンパルス S と励起用レーザー（フェムト秒ファイバレーザー）1 1 からの光が四光波混合を起こし、二つの光の周波数の差と和の周波数のところに、新しいパルス光を生成する。ソリトンパルス S と励起用レーザー 1 1 の波長を変化させることによって、1 2 3 0 ~ 1 5 5 0 nm 等の領域にもパルス光を生成することができる。

【 0 0 6 3 】図 1 0 は第 4 実施例の四光波混合によって生成されたパルス光と励起光、ソリトンパルスの波長と周波数の関係を示す図である。

【 0 0 6 4 】四光波混合では、励起用 LD 3 1 の光とソリトンパルス S の相互作用によって、短波長側と長波長側に新しいパルス光が生成される。励起用 LD 3 1 の周波数を 0、ソリトンパルス S の周波数を 1 とすると、生成されるパルス光の周波数は $2 \cdot 0 - 1$ 、 $2 \cdot 1 - 0$ となる。長波長側への変換効率は光ファイバの特性から低いことが予想されるため、ここでは短波長側に生成されるパルス光に注目する。

【 0 0 6 5 】ソリトンパルス S の波長は 1 5 6 0 ~ 2 0 0 0 nm まで変化可能であるため、励起用 LD 3 1 の波長を 1 5 5 0 nm とすると、短波長側に生成される短波長パルス T の波長は 1 2 3 0 ~ 1 5 4 0 nm まで変換することができる。ソリトンパルス S の波長は入射光強度に対し線形に変化するため、四光波混合パルスの波長も線形に変化し、入射光強度による波長の調整が可能となる。

【 0 0 6 6 】次に、本発明の第 5 実施例について説明する。

【 0 0 6 7 】図 1 1 は本発明の第 5 実施例を示す光ファイバを用いた波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【 0 0 6 8 】この図において、4 1 はフェムト秒ファイバレーザー、4 2 はこのフェムト秒ファイバレーザー 4 1 からの光強度を調整する光強度調整器、4 3 はこの光強度調整器 4 2 から入射パルスを入射するとともに、出力パルスの波長を線形に変化させることができる光ファイバ、R は励起パルス、S はソリトンパルス（ストークスパルス）、H は反ストークスパルスである。

【 0 0 6 9 】この実施例では、第 2 実施例で示した波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置において、長波

長に生成されるソリトンパルス S だけでなく、図 1 2 に示すように、短波長側にも反ストークスパルス H が生成される。この反ストークスパルス H の波長はソリトンパルス S とは逆に短波長側にシフトする。ソリトンパルス S が 1 5 6 0 ~ 2 0 0 0 nm までシフトするとき、反ストークスパルス H は 1 5 6 0 ~ 1 2 8 0 nm までシフトする。この反ストークスパルス H をソリトンパルス S と合わせて用いることによって、1 2 8 0 ~ 2 0 0 0 nm における広帯域な波長可変パルス光源を実現することができる。

【 0 0 7 0 】次に、本発明の第 6 実施例について説明する。

【 0 0 7 1 】図 1 3 は本発明の第 6 実施例を示す波長制御装置付波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【 0 0 7 2 】この図において、5 1 はフェムト秒ファイバレーザー、5 2 はこのフェムト秒ファイバレーザー 5 1 からの光強度を調整する光強度調整器、5 3 は光分岐器、5 4 は光受光器、5 5 は制御回路、5 6 は前記光分岐器 5 3 から入射パルスを入射するとともに、出力パルスの波長を線形に変化させることができる定偏波光ファイバ、R は励起パルス、S はソリトンパルス（ストークスパルス）である。なお、1 4 は光スペクトル分析器、1 5 はパルス幅測定器、1 6 は光パワーメータであり、これらは、出力パルスを測定するために用いられるものであって、本発明の構成要件となるものではない。

【 0 0 7 3 】この実施例では、第 2 実施例で示した波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置（図 2 参照）において、光強度調整器 5 2 における出力光を光分岐器 5 3 で分岐し、その出力光強度の一部を光受光器 5 4 でモニターし、透過光量を所望の大きさに合わせることによって、出力パルスの波長を安定にコントロールすることができる。

【 0 0 7 4 】次に、本発明の第 7 実施例について説明する。

【 0 0 7 5 】図 1 4 は本発明の第 7 実施例を示す波長制御装置付波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【 0 0 7 6 】この図において、6 1 はフェムト秒ファイバレーザー、6 2 はこのフェムト秒ファイバレーザー 6 1 からの光強度を調整する光強度調整器、6 3 は光分岐器、6 4 は光受光器、6 5 は制御回路、6 6 は発振器、6 7 は前記光分岐器 6 3 から入射パルスを入射するとともに、出力パルスの波長を線形に変化させることができる定偏波光ファイバ、R は励起パルス、S はソリトンパルス（ストークスパルス）である。なお、1 4 は光スペクトル分析器、1 5 はパルス幅測定器、1 6 は光パワーメータであり、これらは、出力パルスを測定するために用いられるものであって、本発明の構成要件となるものではない。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 7 】この実施例では第 2 実施例で示した波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置（図 2 参照）において、光強度調整器 6 2 を任意の周波数で変調することによって、ソリトンパルス S の波長を周期的に変化させることができる。このように、光強度調整器 6 2 を変調することにより、波長スキャン機能をもったソリトンパルス発生装置を実現できる。

【 0 0 7 8 】次に、本発明の第 8 実施例について説明する。

【 0 0 7 9 】この実施例では、第 2 実施例で示した波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置（図 2 参照）において、フェムト秒ファイバレーザから出力されるパルス光のパルス幅やスペクトル幅を調整することによって、発生するソリトンパルスのスペクトル幅やパルス幅を変化させることができる。スペクトル幅の狭いパルスは波長分解が必要な計測において重要になる。

【 0 0 8 0 】次に、本発明の第 9 実施例について説明する。

【 0 0 8 1 】この実施例では、第 2 乃至第 4 実施例で示した波長可変ソリトンパルスの発生装置において、出力にラマン光増幅器等の非線形増幅器を用いることにより、短パルス光をパルス幅を広げることなく増幅することができる。この手法を用いれば、ある波長のソリトンパルスを、パルス幅を広げることなく任意の大きさに増幅することができる。

【 0 0 8 2 】なお、本発明によれば、短パルス光源としては、主にフェムト秒ファイバレーザについて説明したが、ピコ秒ファイバレーザを用いるようにしてもよいことは言うまでもない。特に、ピコ秒ファイバレーザを用いる場合には、以下のような利点が挙げられる。

【 0 0 8 3 】ピコ秒パルスで光ファイバを励起すると、入射光強度に対する波長のシフト量がフェムト秒パルスの時よりも小さいため、正確な波長の同調が可能となる。このようなパルス光の波長の正確な調整は、波長多重光通信デバイスの評価や分光等の応用において、精密な波長の調整が必要となる場合に有用である。

【 0 0 8 4 】このように、本発明によれば、

(1) 光源にコンパクトでフェムト秒パルスを生成するファイバレーザを用い、定偏波光ファイバにおける非線形効果を利用することにより、励起光強度を変化させるだけで線形に波長を変化させることができ、装置全体もコンパクトで持ち運びのできるフェムト秒パルス光源を得ることができる。

【 0 0 8 5 】(2) 光源にコンパクトで安定なフェムト秒パルスを出力するファイバレーザを用い、偏波保持型でコア断面積の小さい数十～数百 μm の光ファイバと光強度を連続的に可変することのできる光強度調整器を具備し、理想的なフェムト秒ソリトンパルスを発生し、光強度を変化させるだけでソリトンパルスの波長を広帯域に線形に変化させることのできるポータブルなパルス光

発生装置を得ることができる。

【 0 0 8 6 】(3) 理想的なフェムト秒ソリトンパルスを安定に生成することができる。また、光ファイバへの入射光強度を変化させるだけで、従来のように、光学系の調整を全く行わずに、パルス光の波長を線形に広帯域に変化させることができる。更に、装置全体が非常に小型であるため、持ち運びもできるポータブルなものであり、ほぼメンテナンスフリーである。

【 0 0 8 7 】このような本発明の波長可変短パルス光発生装置及び方法は、波長多重通信用光デバイスの周波数特性・波長依存性の測定装置への応用が考えられる。

【 0 0 8 8 】近年、情報化社会の急速な発展に伴い、光通信技術における更なる情報量の増大が求められている。情報量の増大のため、光通信の時間的な高速化や伝送する光波長の多重化が研究・開発されている。このような状況の中、光通信に用いられる光デバイスの適切な特性評価は欠くことのできない重要な事項である。特に、発光素子・光変調器・光受光器の周波数特性や波長依存性はシステムの特性を決める基本的な特性である。しかし、動作速度の高速化や広帯域化に伴い、素子の特性評価はそれ自身が難しい技術になってきている。

【 0 0 8 9 】本発明によれば、広帯域に渡って素子の波長依存性を評価することができる。また、フェムト秒パルスを入射したときの時間応答を測定することで、素子の周波数特性を規定することが可能となる。この技術は、今後の波長多重通信の更なる広帯域化・高速化に伴い、益々重要になっていくと考えられる。

【 0 0 9 0 】また、本発明の波長可変短パルス光発生装置は非常にコンパクトで安定であり、ソリトンパルスの波長を入射光強度を変化させるだけで変化させることができる。これらの長所のため、本発明は光化学や生物系の分野における高速光応答技術や高速分光、更に高速光エレクトロニクスや非線形光学の分野において、広く活用されると考えられる。

【 0 0 9 1 】なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【 0 0 9 2 】

【発明の効果】本発明によれば、以下のような効果を奏することができる。

【 0 0 9 3 】(A) 光ファイバの長さが十分に長く、入射光強度が十分に大きいとき、誘導ラマン散乱によって、入射パルスの長波長側に新たなパルス光が生成される。このパルス光は、自己位相変調と、波長分散の相互作用であるソリトン効果によって、パルス波形とスペクトル波形が sech^2 型をとる理想的なソリトンパルスになっていく。このソリトンパルスは光ファイバを伝搬するのに伴い、ラマン散乱効果によってスペクトルの中心が長波長側にシフトしていく（この効果をソリトン自

己周波数シフトという)。この時、周波数のシフト量は光ファイバの長さやパルス光の強度に依存するため、両者を変化させることで、波長のシフト量を調整することができる。特に、入射光強度を変化させることにより、波長シフト量を線形に変化させることができる。

【0094】(B)光源にコンパクトでフェムト秒パルス生成するファイバレーザを用い、定偏波光ファイバにおける非線形効果を利用することにより、励起光強度を変化させるだけで線形に波長を変化させることができ、装置全体もコンパクトで持ち運びのできる可搬型のフェムト秒パルス光源を得ることができる。

【0095】(C)光源にコンパクトで安定なフェムト秒パルスを出力するファイバレーザを用い、偏波保持型でコア断面積の小さい数十～数百μmの光ファイバと光強度を連続的に可変することのできる光強度調整器を具備し、理想的なフェムト秒ソリトンパルスを発生させ、光強度を変化させるだけでソリトンパルスの波長を広帯域に線形に変化させることのできるポータブルなパルス光発生装置を提供することができる。

【0096】(D)本発明の波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置では、理想的なフェムト秒ソリトンパルスを安定に生成することができる。また、光ファイバへの入射光強度を変化させるだけで、光学系の調整を全く行わずに、パルス光の波長を線形に広帯域に変化させることができる。更に、装置全体を非常に小型にすることができる。また、ほぼメンテナンスフリーである。

【0097】(E)フェムト秒ソリトンパルスの波長を1560～1710nmまで変化させることができる。更に、実験系を最適化することで、約2000nmまで波長を変化させることができる。

【0098】(F)波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の出力を非線形結晶に通すことによって、第2高調波の短パルス光を得ることができる。ソリトンパルスの波長を線形に1560～2000nmまで変化させることによって、780～1000nmの領域で線形に波長を変化させることのできる短パルス光を得ることができる。

【0099】(G)本発明の波長可変ピコ秒パルスで光ファイバを励起すると、入射光強度に対する波長のシフト量がフェムト秒パルスの時よりも小さいため、正確な波長の同調が可能となる。このようなパルス光の波長の正確な調整は、波長多重光通信デバイスの評価や分光等の応用において、精密な波長の調整が必要となる場合に有用である。

【0100】(H)レーザからの入射パルスとともに、もう一つの異なる波長のレーザ光を光ファイバに入射した時、光ファイバ中の四光波混合によって、短波長側と長波長側に新たなパルス光が生成される。このパルス光の波長は、二つの光の周波数の和と差の周波数のところに対応する。そして、ソリトンパルスと励起用レ

ーザの波長を変化させることによって、1230～1550nm帯の領域にもパルス光を生成することができる。また、短波長側に生成される反ストークスパルスを用いることでも同様に、広帯域な短パルス光を得ることができる。

【0101】(I)光ファイバ中で生成されたソリトンパルスは、光ファイバラマン増幅作用を用いて短パルスのまま増幅することができる。

【図面の簡単な説明】

10 【図1】本発明の第1実施例を示す波長可変短パルス光発生装置の模式図である。

【図2】本発明の第2実施例を示す波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【図3】本発明の第2実施例による光ファイバの出力におけるソリトンパルスのスペクトルの測定結果を示す図である。

【図4】本発明の第2実施例による光ファイバへの入射光強度に対するソリトンパルスのスペクトルの中心波長の変化を示す図である。

20 【図5】本発明の第2実施例による光ファイバ長とスペクトル幅、パルス幅の関係を示す図である。

【図6】本発明の第2実施例を示すファイバ長と波長シフト量の関係を示す図である。

【図7】本発明の第3実施例を示す波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【図8】本発明の第3実施例による波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置を用いて生成された第2高調波の中心波長の入射光強度依存性を示す図である。

30 【図9】本発明の第4実施例を示す四光波混合を用いたフェムト秒パルスの広帯域波長可変パルス発生装置の模式図である。

【図10】図9に示した四光波混合によって生成されたパルス光と励起光、ソリトンパルスの波長と周波数の関係を示す図である。

【図11】本発明の第5実施例を示す光ファイバを用いた波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【図12】本発明の第5実施例を示す波長変換後の出力光のスペクトルを示す図である。

40 【図13】本発明の第6実施例を示す波長制御装置付波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【図14】本発明の第7実施例を示す波長制御装置付波長可変フェムト秒ソリトンパルス発生装置の模式図である。

【符号の説明】

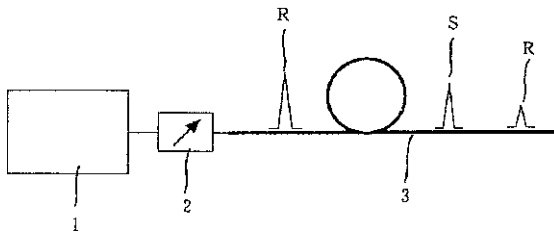
- 1 短パルス光源
- 2 光特性調整器
- 3, 33, 43 光ファイバ
- 50 R 励起パルス

- S ソリトンパルス
- 1 1 , 4 1 , 5 1 , 6 1 フェムト秒ファイバレーザ
-
- 1 2 , 4 2 , 5 2 , 6 2 光強度調整器
- 1 3 , 5 6 , 6 7 定偏波光ファイバ
- 1 4 光スペクトル分析器
- 1 5 パルス幅測定器
- 1 6 光パワーメータ
- 2 1 非線形結晶

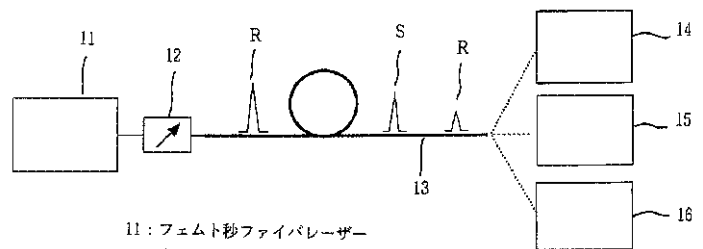
- D 第 2 高調波短パルス
- 3 1 励起用半導体レーザー (励起用 LD)
- 3 2 結合器
- H 反ストークスパルス
- T 短波長パルス
- 5 3 , 6 3 光分岐器
- 5 4 , 6 4 光受光器
- 5 5 , 6 5 制御回路
- 6 6 発振器

【 図 1 】

【 図 2 】



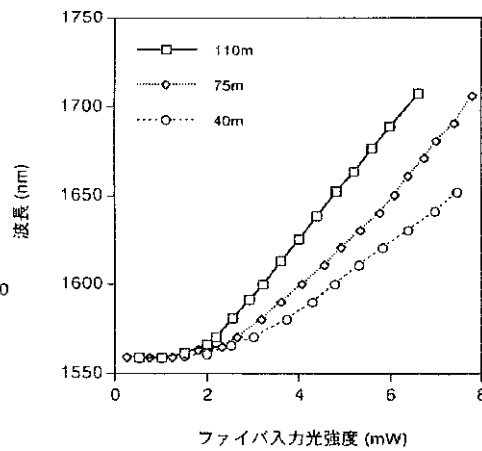
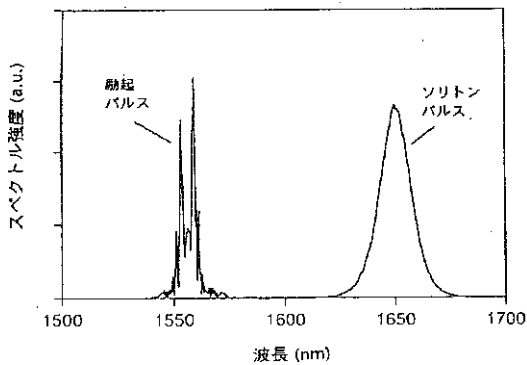
- 1 : 短パルス光源
- 2 : 光強度調整器
- 3 : 光ファイバ
- R : 励起パルス
- S : ソリトンパルス



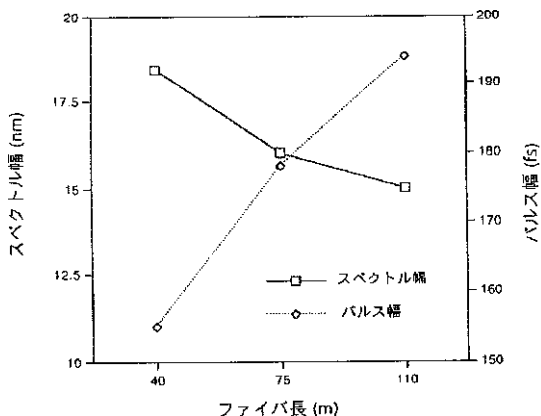
- 11 : フェムト秒ファイバレーザ
- 12 : 光強度調整器
- 13 : 定偏波光ファイバ
- 14 : 光スペクトル分析器
- 15 : パルス幅測定器
- 16 : 光パワーメータ
- R : 励起パルス
- S : ソリトンパルス

【 図 3 】

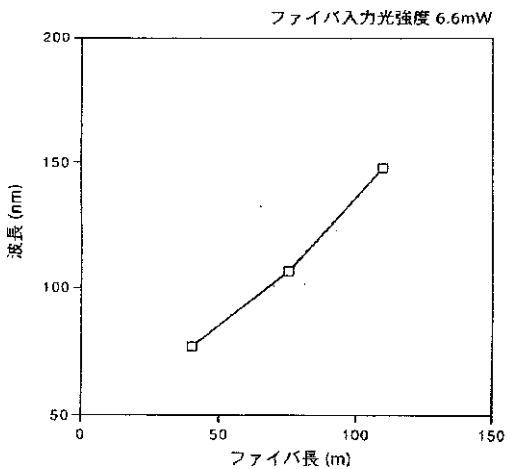
【 図 4 】



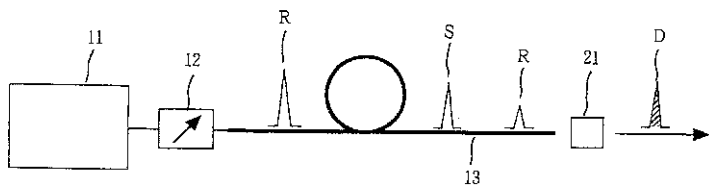
【図 5】



【図 6】

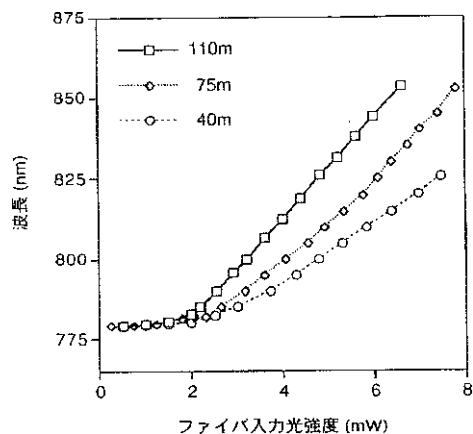


【図 7】

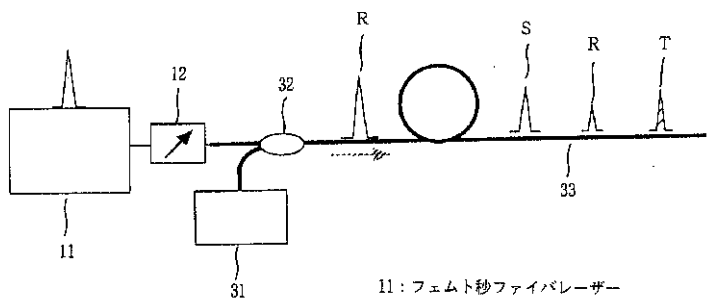


- 11: フェムト秒ファイバレーザー
- 12: 光強度調整器
- 13: 定偏波光ファイバ
- 21: 非線形結晶
- R: 励起パルス
- S: ソリトンパルス
- D: 第 2 高調波 短パルス

【図 8】

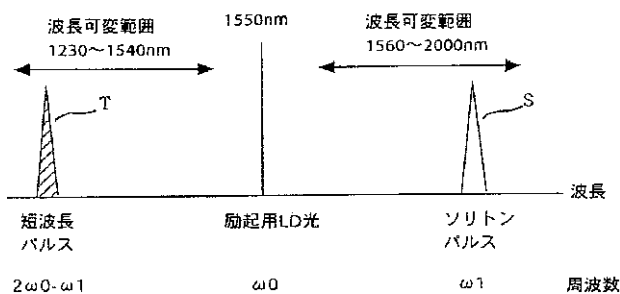


【図 9】

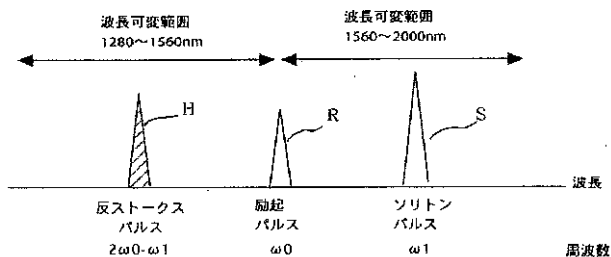


- 11: フェムト秒ファイバレーザー
- 12: 光強度調整器
- 31: 励起用半導体レーザー
- 32: 結合器
- 33: 光ファイバ
- R: 励起パルス
- S: ソリトンパルス
- T: 短波長パルス

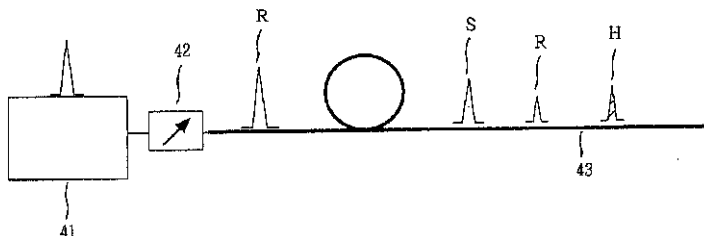
【 図 1 0 】



【 図 1 2 】

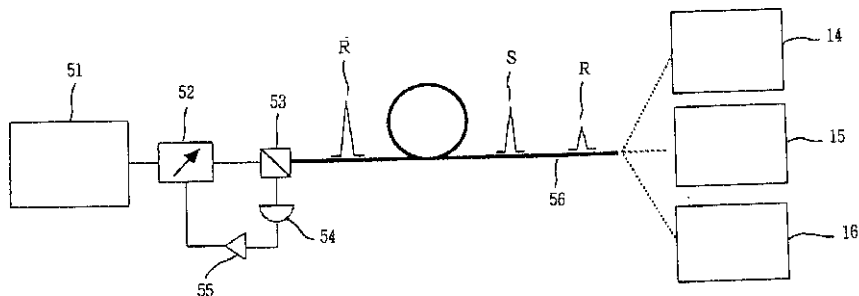


【 図 1 1 】



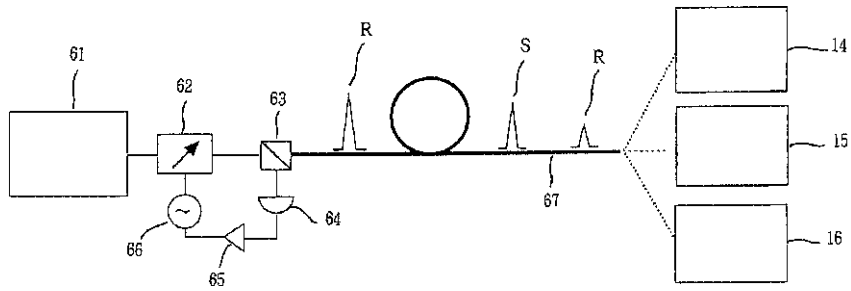
- 41: フェムト秒ファイバレーザー
- 42: 光強度調整器
- 43: 細径定偏波光ファイバ
- R: 励起パルス
- S: ソリトンパルス
- H: 反ストークスパルス

【 図 1 3 】



- 14: 光スペクトル分析器
- 15: パルス幅測定器
- 16: 光パワーメータ
- 51: フェムト秒ファイバレーザー
- 52: 光強度調整器
- 53: 光分岐器
- 54: 光受光器
- 55: 制御回路
- 56: 定偏波光ファイバ
- R: 励起パルス
- S: ソリトンパルス

【 図 1 4 】



- | | |
|--------------------|---------------|
| 14 : 光スペクトル分析器 | 64 : 光受光器 |
| 15 : パルス幅測定器 | 65 : 制御回路 |
| 16 : 光パワーメータ | 66 : 発振器 |
| 61 : フェムト秒ファイバレーザー | 67 : 定偏波光ファイバ |
| 62 : 光強度調整器 | R : 励起パルス |
| 63 : 光分岐器 | S : ソリトンパルス |

フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)
G02F 1/35
J I C S T ファイル (J O I S)