

ラマンファイバーとCW白色光の発生

電子物性工学科 植田研究室 9724025 谷口 篤

まえがき

近年、インターネットの普及によって情報通信量は飛躍的に増大しており、光通信システムの大容量化が望まれている。そのなかで TDM(時分割多重通信技術)や WDM(波長多重通信技術)といった大容量通信技術が現在主に考えられている。ソリトン伝送システム¹が開発されたことによって時間のパルス幅を変えずに伝送することができるようになり、今では TDM を使った 1Tbit/s 近くの通信が可能になってきている。しかし、さらに多くの情報を送るためにはソリトン・パルス伝送を使った TDM だけでは限界があり、WDM を使う必要がある。

WDM は、現在通信でよく使われている 1.3 μm から 1.55 μm において波長領域で信号を多重することによって、大容量光通信システムを可能にすることができる。しかし、WDM を使って長距離伝送するためには広帯域にしかも効率良く光増幅ができる増幅器が必要であり、その手段として RFA (ラマンファイバー増幅器) が有力だと考えられている。

この RFA の励起用の光源として我々は PDF(P-添加ファイバー)を用いたラマンファイバーレーザーを提案し、その研究を行った。またこのラマンファイバーレーザーに SMF(シングルモードファイバー)を融着することにより発振した、CW の超広帯域ファイバーレーザーについても研究を行った。

1、ラマンファイバーレーザー

現在、光通信技術の進歩によってファイバーを加工した光デバイスが発達し、ファイバー中に紫外レーザーを使って干渉縞を書き込むことにより特定の波長のみを反射させる波長選択ミラー FBG^{2,3} やファイバー中に希土イオンを添加し、さらにより光を効率良くファイバー中に入力するために屈折率の違う 2 つのクラッドを用いた DCFL (ダブルクラッドファイバーレーザー)³ などがある。

通常、RFA では図 1 のようにファイバー中に含まれている SiO_2 や GeO_2 のもつラマン利得を使って、信号光とは反対方向から励起光 (例えば石英ファイバー中でもっとも損失の少ない波長 1.55 μm を信号光と考えると、励起光は波長 1.484 μm にあたる。) をファイバー中に入れることによって、信号光を広帯域に増幅するシステムである。しかし、1.55 μm では他にも増幅器として EDFA(Er-添加ファイバー増幅器)があり、むしろ 1.55 μm では EDFA の方が主流になっている。しかし EDFA は 1.55 μm 付近でしか増幅することができず、WDM の増幅器としては広帯域に増幅ができ、しかもラマンはシフトによって発振波長が変わるので励起波長を変えることによって波長を変えることができる RFA が必要になるのである。

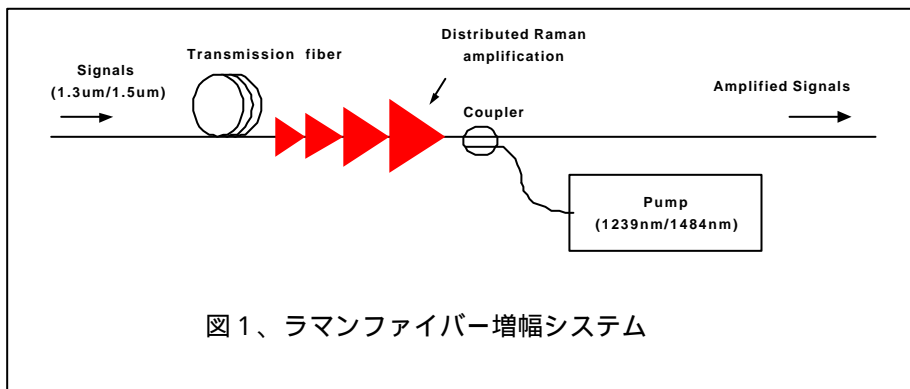


図 1、ラマンファイバー増幅システム

我々はこの RFA 用の光源として用いるために PDF⁴を用いた。P₂O₅ は SiO₂ や GeO₂ とは異なり、図 2 のようにピークが非常に鋭く 1330 cm^{-1} と広いラマンシフトを持ち、波長 1064 nm を用いて励起すると波長 1239 nm に 1 次ストークス光、波長 1484 nm に 2 次ストークス光が現れる。そこでストーク

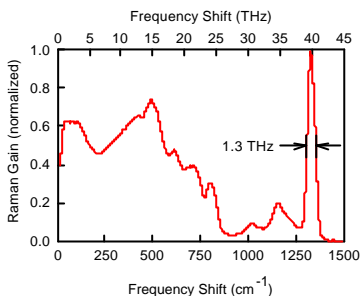


図 2、P 添加ファイバーのラマン利得

ス光にあたる波長帯に 2 つの FBG (Fiber-Bragg Gratings) を用いて共振器を構成し、波長 1064nm で最大出力 8.4 W の CW の Yb を添加した DCFL を用いて励起することによってレーザー発振を行った。これは、発振過程をすべてファイバー中で行うことができるので非常にロスが少なく、どこでもすぐに発振することができ、また、DCFL を用いて励起することによって非常に光強度の高いレーザーを発振する事ができるなどの利点がある。

一次ストークスファイバーレーザーに関してはすでに我々の研究室でスロープ効率 76.9% で最大出力 4.11W が得られ、パワー変換効率が 47.4% に達していた。そこで次に我々は 1239nm にはほぼ 100% の共振器を組み光を強制的に閉じこめ、中心波長 1483.4 nm の FBG を用いた共振器を用いることによって二次ストークス光におけるラマンファイバーレーザーを発振させた。

また出力側の FBG の反射率 (R=50%/15%) や、PDF の長さ (300m/700m/1150m) を変えることによってもっとも二次ストークスが高出力に発振する値を実験から求め、このときの出力側の FBG の反射率は 15% で PDF の長さは 700m の時であった。その時の実験図を図 3 に示す。このときスロープ効率 36.3%、最大出力 2.8 W、パワー変換効率 41% が得られた。これは単位面積あたりに直すと約 100GW/cm² にもなり非常に高い光強度を持っていることがわかる。

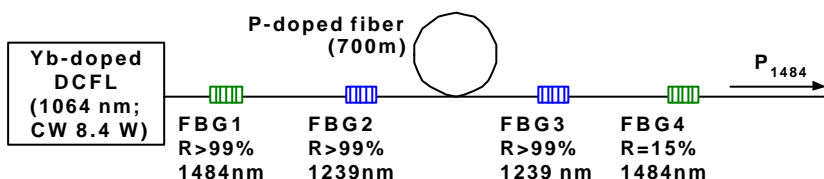


図 3、二次ストークスラマンファイバーレーザー装置図

2、超広帯域ファイバーレーザー

つぎに図 4 のように、この 2 次のストークス光におけるラマンファイバーレーザーに長さ 350m の

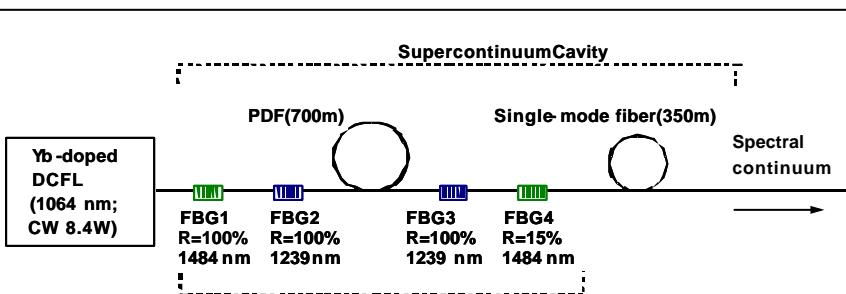


図 4、超広帯域ラマンファイバーレーザー装置図

SMF を融着することにより 2 次のストークス光 (1484 nm) で約 120 nm (0dB) にも及ぶ帯域を持つ CW の超広帯域ファイバーレーザー

を発振させた。出力は 2.78 W であった。SMF には Corning 社の Flexcor1060 を用いた。この SC(白色光)スペクトルは広帯域な RFA 用の光源として⁵やファイバー中での損失分散測定的光源としても利用できると思われる。

この SC スペクトルの現象について調べるために、超広帯域ファイバーレーザーの SMF 部を液体窒素に入れることによって 77K にまで冷却したときのスペクトルの変化を調べた。すると図 6 のように FBG の中心波長である 1484 nm よりも低波長域のみでスペクトルの温度依存性が観測された。また、同様に PDF 部も液体窒素に入れ冷却し、SC のスペクトルの変化を調べたがほとんど変化はみられなかった。このことから長波長側と短波長側ではそれぞれ別の現象が起きていて、

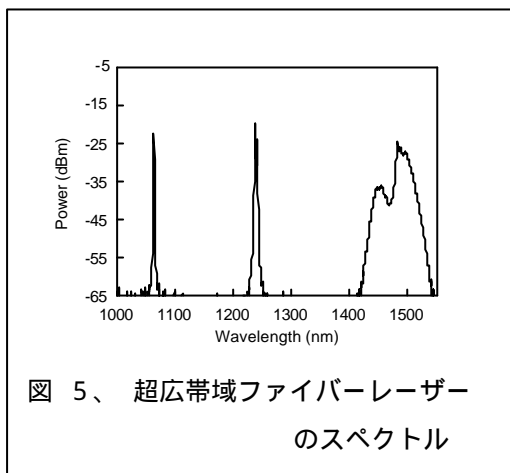


図 5、超広帯域ファイバーレーザーのスペクトル

短波長側のスペクトルの変化は SMF 部で起きていると考えられる。

短波長側のシフトの理由としては以下のようなことが考えられる。

通常、ファイバー中での非線形光学効果は非線形シュレーディンガー方程式から以下のように与えられる。

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{a}{2} A + \frac{i}{2} b_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} = ig|A|^2 A$$

このとき、 A は複素電界振幅、 a はファイバーの損失で、 $T = t - b_1 z$ であり $1/b_1$, b_2 はそれぞれ ω_0 での群速度と群速度分散を表す。

このとき自己位相変調や四光波混合のような 3 次の非線形は右辺の項から与えられ、 a に依存している。また b_2 は n_2 に比例し、この n_2 には温度依存性があり低波長側のスペクトル変化として以下のような理由が考えられる。

() 自己位相変調

CW 光での自己位相変調はあまり観測されてない。というのは自己位相変調の周波数シフトは時間を T

とすると $d\omega(T) = -\frac{\partial f_{NL}}{\partial T}$ で与えられ、 f_{NL} は光強度 I に比例するのでこの式から光強度 I の時間変

化がなければ起こらないことがわかる。

() 変調不安定性

ほんのわずかな振幅の変化があるとその変化によって生ずる自己位相変調によって、負の群速度分散を介してその振幅変化はさらに増長される現象を MI(変調不安定性)という。

周波数領域では FWM とほとんど同じ変化であるが、CW で起こることが出来るという特徴がある。

() 部分的コヒーレンス

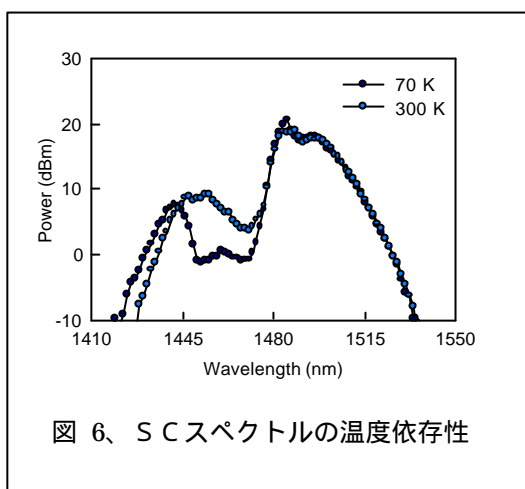


図 6、SC スペクトルの温度依存性

ファイバーレーザーのスペクトルは光スペクトルアナライザーを用いて FWHM(半値全幅)を調べると、約 1nm あり、コヒーレンス長は数 mm 程度しかないと考えられる。このようにコヒーレンス長が短いために、位相関係がでたらめになり、時間的な変動が生じて自己位相変調が生じる。

以上の 3 つの非線形効果は出力光に時間的な変化が見られなければならない。しかし、今のところ高速オシロスコープを用いて 50ps の範囲までの時間波形を調べたが振幅の時間変化は見る事ができなかった。

他には下のようなものも考えられる。

() 四光波混合

通常、四光波混合が起こるには位相整合条件を満たさなければならないが、() のようなラマン効果が重なって起こっているのかもしれない。

() ラマン効果

非常に光強度が高いために GeO₂ のラマンのストークス光とアンチストークス光がでた可能性がある。しかし、アンチストークス光は主に吸収なのでラマン効果だけでアンチストークス光が出たとは考えにくい。

しかし、これは長波長側のスペクトル変化を説明するには一番適していると考えられる。というのはストークス光のラマンシフトは温度に依存しないからである。また短波長側の温度変化に対してはラマン効果がラマン温度計として使われているようにストークス光とアンチストークス光の強度比が温度に依存し、そのスペクトル変化とも考えられるからである。この場合短波長側は、波長シフトではなく強度変化だと考えられる。これについて調べるにはちゃんとラマン利得を調べる必要がある。

などが可能性として考えられるだろう。これらについて調べるためには、まず時間波形を調べ、またラマン利得についてもう少し厳密に出す必要があると考えられる。

参考文献

G.P.Agrawal "NONLINEAR FIBER OPTICS-SECOND EDITION- "

1, 藤井 陽一 "ソリトン多重通信" レーザー研究、第 24 巻、第 6 号、1996

2, K.O.Hill, G.Meltz "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview," J. Lightwave Technol, vol. 15, No. 8, 1997.

3, J.L. Archambault, S.G.Grubb "Fiber Grating in Lasers and Amplifiers," J. Lightwave Technol, vol. 15, No. 8, 1997.

4, V.G.Plotnichenko, V.O. Sokolov, V.V. Koltashev, V.B. Sulimov, E.M. Dianov

"UV-irradiation-induced structural transformation in phosphosilicate glass fiber" Opt. Lett. Vol.23, No. 18, 1998

5, H.Kidorf, K.Rottwitt, M.Nissov, M. Ma, E. Rabarijaona "Pump Interactions in a 100-nm Bandwidth Raman Amplifier" IEEE Photon. Technol. Lett, Vol.11, No.5, 1999