

# 1.6 μm 帯ラマン増幅器の開発

量子・物質工学科 植田研究室 福島 正道

## 1. 序論

原子スペクトルの精密計測技術によって実現される高精度な原子時計は、全地球測位システム (GPS) 制度の向上や超高速大容量通信ネットワークなど、現代社会を支える先端技術において必要不可欠な技術となっている。近年では従来の時間の国際標準であるセシウム原子時計に変わり、光格子時計による周波数基準を基にして秒を再定義しようとする動きが高まっている。

光格子時計とは、2001年に東京大学工学系研究科の香取秀俊准教授(当時)によって提案され、2005年に実現された新しい方式である。「レーザー冷却された中世アルカリ土類原子集団を対象としたラザード分光」及び、「単一イオンのラム・ディック領域でのドップラーフリー分光」の2つの測定方法のメリットを両立したアイデアであり、1次のドップラーシフトの排除、複数の原子を同時に探査することによって S/N 比の向上に成功し、極限的な安定度と正確さを併せ持つ原子時計を構成している。原子は複数本のレーザー光による空間的な干渉パターンによる三次元的なラム・ディック領域に閉じ込められるが、この三次元の光格子トラップポテンシャル自身が原子の遷移周波数に影響を与えてしまう。このとき、マジック波長と呼ばれる波長にトラップ波長を同期することでトラップポテンシャルが遷移周波数に与える影響を消失させることができる。

本研究では Sr 原子を用いた光格子時計のトラップ用光源(813 nm)の2倍波長である 1627 nm レーザーの出力を fiber-MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)によって増幅することを目的とし、

自己遅延ヘテロダイナミクスによるマスターレーザーの線幅測定、ナイフエッジ法による励起光源のビームプロファイル測定を行い、計算機による増幅シミュレーションを行った。

## 2. 原理・装置

### 2.1 誘導ラマン散乱

光ファイバー内で起こるラマン散乱とは、伝搬する信号光が別の伝搬光に移される現象である。この別の伝搬光はストークス光と呼ばれ、元の信号光とは分子振動の振動モードの運動エネルギーに相当する周波数の差を持つ。Fig. 1 にラマン散乱のエネルギー図を示した。また、ラマン閾値の式を以下に表す。

$$P_{th}^{SRS} \approx \frac{16A_{eff}}{g_R l_{eff}}$$

ただし、 $g_R$ はラマン利得、 $A_{eff}$ は有効コア面積、 $l_{eff}$ は有効相互作用長である。誘導ラマン散乱とは非線形媒質にラマン閾値を超えるような強いポンプ光を入射すると自発的にラマン散乱が生じ、ポンプパワーの大半がストークス光パワーに変換される現象である。

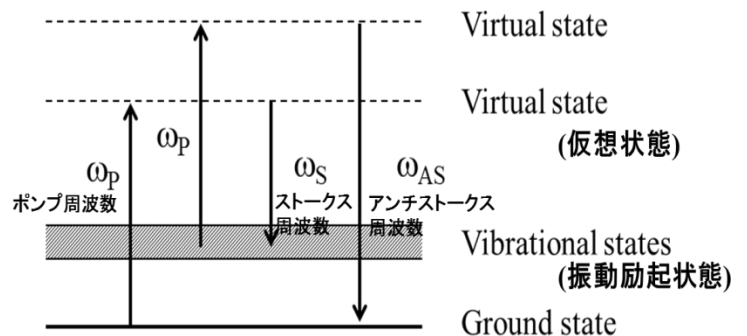


Fig. 1. ラマン散乱のエネルギー図

## 2.2 fiber-MOPA

fiber-MOPA とは、マスターレーザーと増幅器の両方で構成され、マスターレーザーの性質をそのままに、ファイバー中で出力増幅を行うことができる手法である。特徴としてはビーム品質が良く、機械的安定性が良い、高冷却効果が見込める。また、光学系がオールファイバーで構成できるため、系を軽量かつ小型で構成することができる。

本実験のマスターレーザーには発信波長 1627 nm の DFB(Distributed Feedback)レーザー、増幅器には発信波長 1550nm の EDFL(Erbium Doped Fiber Laser)を用いて光学系(Fig. 2)を構築した。

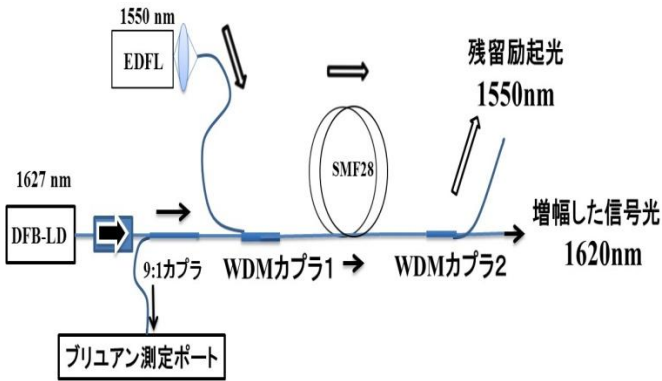


Fig. 2. 実験光学系

## 3. 実験

### 3.1 自己遅延ヘテロダイン法

DFB レーザーの線幅測定に自己遅延ヘテロダイン法を用いた。出力光はファイバカプラによって光を2つに分け、片方は 1 km ファイバーで遅延させ、もう片方は音響光学素子(AOM)で周波数シフトさせた。その後ビームスプリッターで再度重ね合わせ、ビートを RF-spectrum analyzer で測定した(Fig. 3.)。この時の分解能は

$$\Delta f = \frac{c}{nL} = 200 \text{ kHz}$$

であった。ただし、 $c$  は光速、 $n$  はコアの屈折率、 $L$  は遅延ファイバー長である。

得られたビート信号をローレンツフィッティングによって規格化した(Fig. 4)。この結果、線幅は約 1.5 MHz であった。

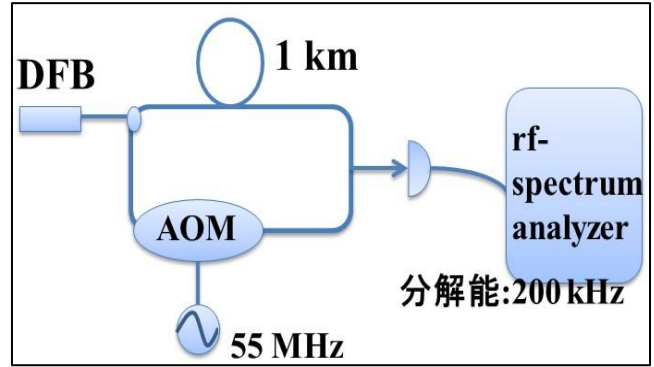


Fig. 3 自己遅延ヘテロダイン測定実験系

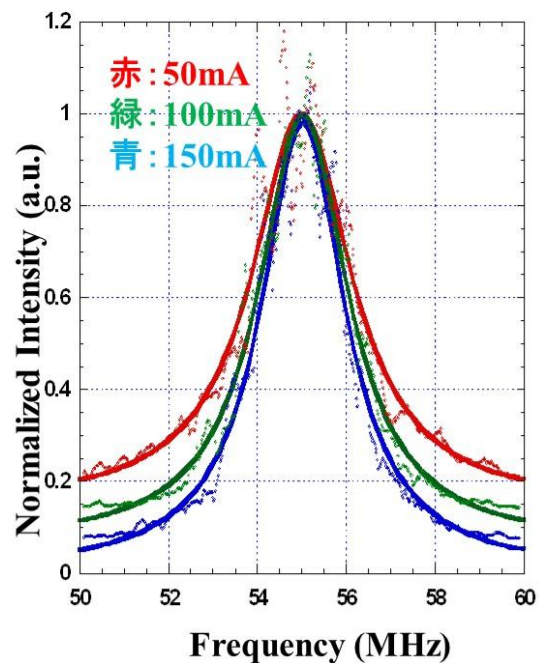


Fig. 4 フィッティング後のビート信号

### 3.2 ナイフエッジ法

励起光源として用いた IPG PHOTONICS 社の発信波長 1550 nm の EDFL は赤外光かつ、通常の CCD カメラでは捉えることができない。また、ビームモードが不明だったためナイフエッジ法によるビームモードの測定を行った。自由空間を伝播するレーザー光の進行方向に  $z$  軸、進行方向に垂直な 2 方向に  $x$  軸、 $y$  軸を取った。本実験で用いたレーザーは、位置  $z$  における  $z$  軸に垂直な断面の強度分布が、 $x$  方向、 $y$  方向それぞれ Gaussian で記述

されるため Gaussian 光と呼ばれ、特にその中でも TEM00 モードという光である。実験系を Fig. 5 のように取った。

実際にはナイフの刃によってビームの一部を遮り、通過した部分のビーム強度を Photo Detector によって測定した。移動ステージを用いて  $y$  軸方向に徐々に刃を移動させてビームを遮りながらビーム強度を測定すると、ある位置  $z$  でのビーム径が分かる。さらに、このビーム半径測定を様々な  $z$  について行い、それぞれ以下の誤差関数を用いてフィッティングをおこなった(Fig. 6.)。

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$$

それらを整理すると  $xy$  平面内でのビームウエスト  $\omega_{0x}$  が求められた(Fig. 7.)。このとき、以下の式によってフィッティングを行った。

$$\omega_x^2(z) = \omega_{0x}^2 \left[ 1 + \left( \frac{M^2 \lambda (z - z_x)}{\pi \omega_{0x}^2 n} \right)^2 \right]$$

$\lambda$  は波長、 $M^2$  はエムスクエア、 $n$  は屈折率、 $z_x$  はビームウエストを取るときの  $z$  軸の位置である。



Fig. 5. 実験図

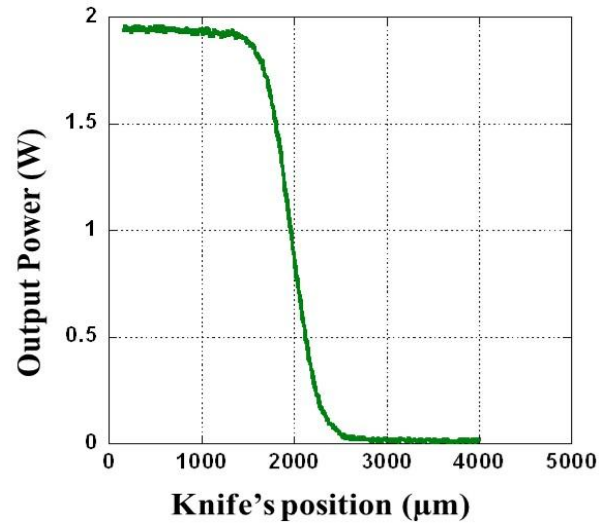


Fig. 6. ビーム径測定

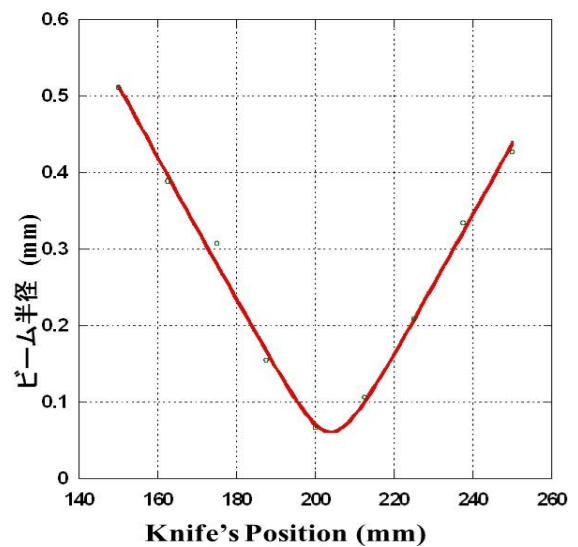


Fig. 7. ビームウエスト測定

以上の測定から Gaussian ビームのビームプロファイルを決め、エムスクエアは 1.15、ABCD 則によって元のビームウエストは 4.2 mm となった。

### 3.3 計算機シミュレーション

計算機を用いて、ラマン増幅の計算シミュレーションを行った。ラマン増幅ではポンプパワーが大きければ大きいほど、ファイバー長が長ければ長いほど Output Power はポンプパワー近くまで増幅される。しかし、単一周波数ファイバー増幅では、ファ

ファイバー中に励起された音響フォノンによって光が後方へ散乱される SBS が問題となり、増幅は制限される。その閾値は以下の式で表せる。

$$P_{th,SBS} \approx 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}}$$

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha L)) \quad \left( \alpha = \frac{g_R P_p}{A_{eff}} \right)$$

ただし、 $A_{eff}$ は有効コア面積、 $g_B$ はブリルアン利得係数、 $L_{eff}$ は有効相互作用長、 $L$ はファイバー長、 $g_R$ はラマン利得係数、 $P_p$ はポンプパワーである。式から見て分かるように、ファイバー長が長くすると SBS 閾値が下がってくるのが分かる。つまり、ある程度の増幅ができ、かつ SBS 閾値が効いてこないようにファイバーの長さを決定しなくてはならない。その結果をシミュレーションしたのが Fig. 8 である。

#### 4. まとめと今後の展望

光学系を組み、計算機シミュレーションを行うことで最大出力 18 mW のマスターレーザーを 4 W まで増幅できることが分かった。

今後の展望としては励起光をシングルモードファイバーに入れる時のカップリング効率の向上、また、実際にラマン増幅実験を行ってシミュレーションとの比較をし、最終的には PPLN 等の波長変換素子を用いてトラップ波長である 813 nm を出し、その時の変換効率を考慮する必要があるだろう。

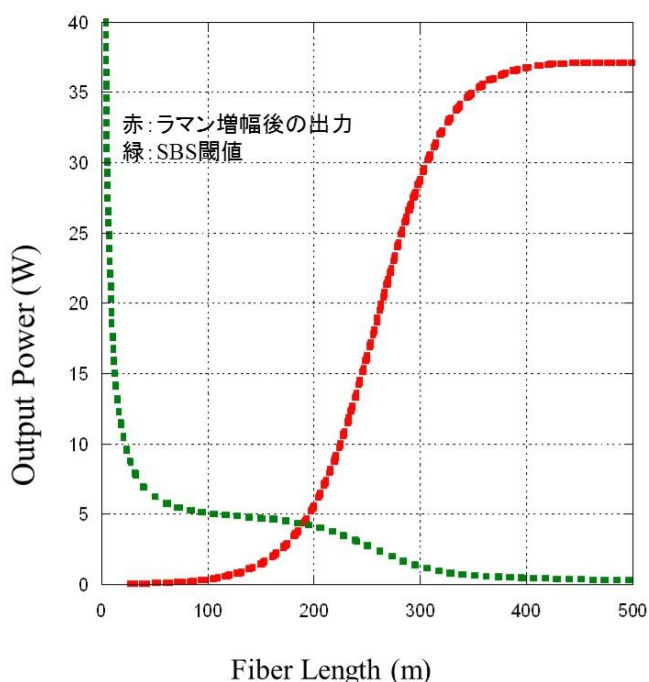


Fig. 8. 計算機シミュレーション

このシミュレーションからファイバー長をおよそ 200 m にすると約 4 W の増幅が得られることが分かった。