

可飽和吸収体 Cr⁴⁺:YAG による 固体レーザー出力特性と2波長発振の 可能性

電気通信大学 量子物質工学科 植田研究室 仁藤慎平

< 実験の目的 >

現在、1150 ~ 1200nmで発振できるレーザー媒質の数は少ない。そこで今回の実験ではレーザー媒質Nd:YVO₄(Y₃Al₅O₁₂)に可飽和吸収体Cr⁴⁺:YAGを用いることによって、Q-switchレーザーを発振させる。これにより共振器内の強度を高めラマンシフトにて1178nmのレーザーを取り出すことが出来る。これによりNd:YVO₄の持つ波長の広帯域化を狙うのが本実験の目的である。

< 実験の原理 >

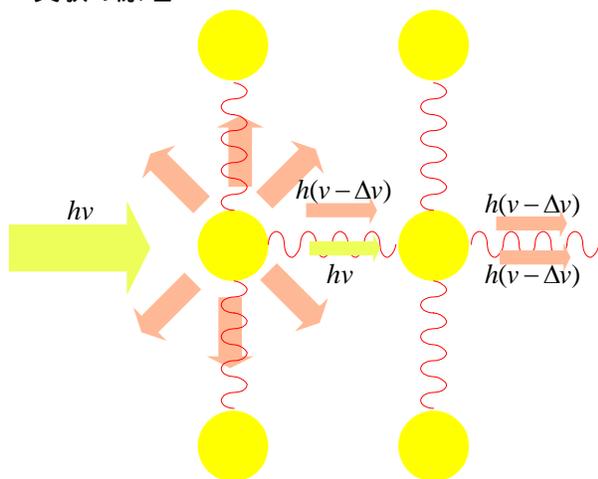


図 1

図1のように熱振動を起こしている原子に光が照射されると、光の一部のエネルギーが原子に移り、光は変調される。その結果、原子から入射光の波長とは少しだけずれた波長の光が散乱される。これがラマン散乱と呼ばれるものである。また、散乱光の一部が入射光と同方向に散乱され、次の原子でも同じような入射光による散乱が起こる。同様にして散乱の一部がまた入射光と同方向に散乱される。この繰り返しによって入射光と同方向の散乱光だけが誘導放出される。つまり強いレーザー光を媒質に当てることによって少し波長のずれた指向性の高いコヒ

ーレントな光が取り出せるのである。これが誘導ラマン散乱である。入射光はなるべく強度の高い光であることが望ましくそのために今回はQ-switchによる尖頭出力の高いパルスレーザーを発振させるべく共振器を組んだ。

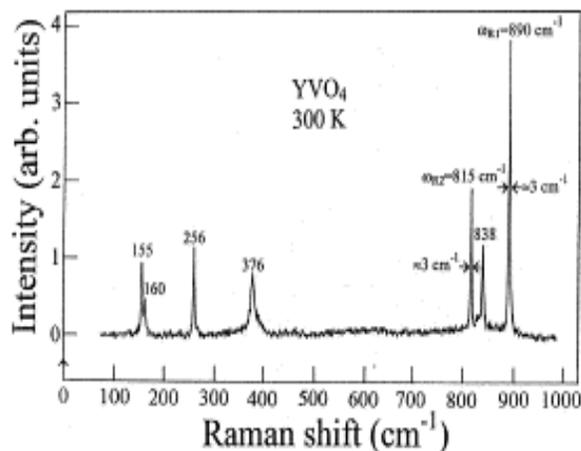


図 2

また、図2をみるとNd:YVO₄は890cm⁻¹で一番ラマンシフトを起こしやすくそれによって1178nmが取り出しやすいことが分かる(1)。(図3参照)

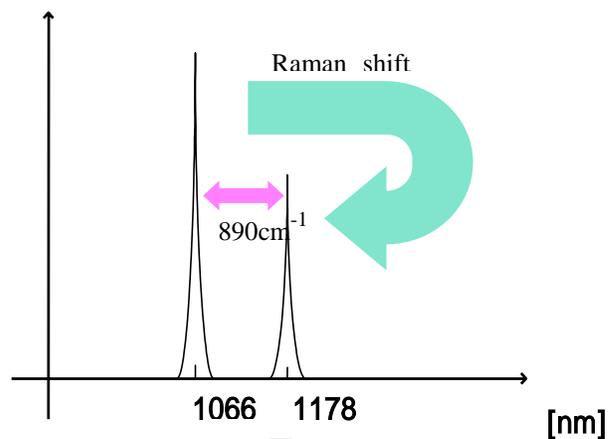


図 3

< 実験図 >

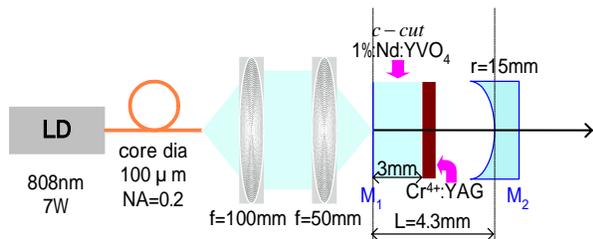
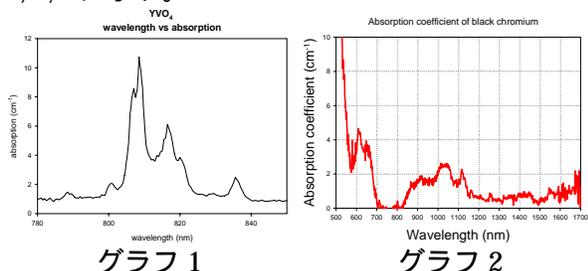


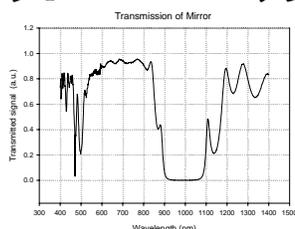
図 4

共振器を図 4 のように組み上げた。励起光の電源はDioScr0102-LA8V6-PA8V12 を使用した。最大出力は 7W となっている。電源にコア直径 100 μm、NA=0.2 のファイバーをつなげて励起光を発振させ、それをF=100mmとF=50mmのレンズで集光してレーザー媒質であるNd:YVO⁴⁺の端面に当てて励起させた。Nd:YVO⁴⁺の前面にはHRコーティングが施されており 808nmの波長で全透過し1066nmの波長で全反射する。よってNd:YVO⁴⁺の前面部分はミラーの役割を果たしている。前面方向のミラーを別途取り付ける必要がないので、アライメントがしやすく更に共振器長も短くすることが出来、発振も容易になっている。更にHR1066nm、r=15mmの出力ミラーを用いて共振器を組み上げた。Nd:YVO⁴⁺の吸収波長帯と可飽和吸収体Ca²⁺:Cr⁴⁺:YAGの吸収波長帯と出力ミラーの発振波長帯による反射率をそれぞれグラフ1,2,3に示す。



グラフ 1

グラフ 2



グラフ 3

< 出力ミラーの反射率の測定 >

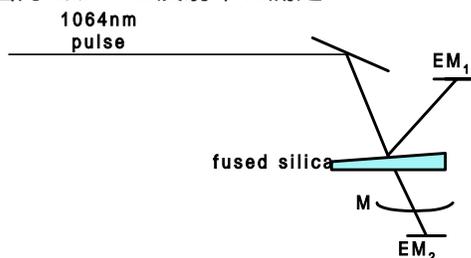


図 5

先ほど出力ミラーはHR1066nmと記述したが実際、

その波長で全反射してしまうと、いくら共振器内の強度が上がっても1066nmで発振することは出来ない。そこで発振波長での出力ミラーの反射率を更に詳しく求める必要がある。

図 5 のように励起光の電源とは別の電源を用いて発振波長 1064nmでパルスレーザーを発振させ出力ミラーの反射率を測定した。シリカガラスと出力ミラーにレーザーを透過させてエネルギーメーターで測定した値をEM₂とし、シリカガラスで反射したレーザーをエネルギーメーターで測定した値をEM₁とする。測定した値は以下のようになった。

EM ₁	158.1mW
EM ₂	42.4mW

2 つの測定した値の比を以下の式に当てはめることによって出力ミラーの反射率を求めることが出来る。

$$\frac{EM_2}{EM_1} = \frac{T_M T_{glass}^2}{(1 - T_{glass})}$$

$$R_{glass} = 1 - T_{glass} = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

右辺のT_{glass}が2乗であるのはレーザーがシリカガラスの前面と後面で2回反射しているためである。シリカガラスの屈折率は常温でn=1.44なのでシリカガラスの反射率はR_{glass}=0.037と計算できその結果出力ミラーの反射率はR_M=0.989となった。共振器内の強度を上げるためには発振波長帯の出力ミラーの反射率は限りなく100%に近い値が望ましいので良い結果だといえる。

< 共振器のモード径の測定 >

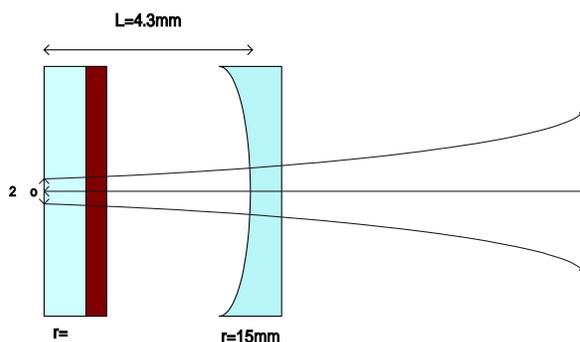


図 6

共振器のモード径は励起光の特性にかかわらず共振器内の距離と使用する2つのミラーの特性だけで決まる。モード径を求める式は以下の通りである。

$$\omega_o^2 = \frac{L\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2}}$$

$$g_1 = 1 - \frac{L}{r_1}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$$

よって図 6 のパラメーターを代入して計算すると ($\lambda = 1064\text{nm}$, $n = 3.1417$) ビームウエスト位置でのモード半径は $r_0 = 47 \mu\text{m}$ であった。この r_0 での位置に CCDカメラを設置して励起光のビーム径を測定した。結果 $40 \mu\text{m}$ となった(図 参照)。 r_0 はビーム半径より少し大きい値となってしまったが十分にモードマッチングできているものと思われる。よって励起時での損失は少ないと思われる。

< 共振器内の強度測定 >

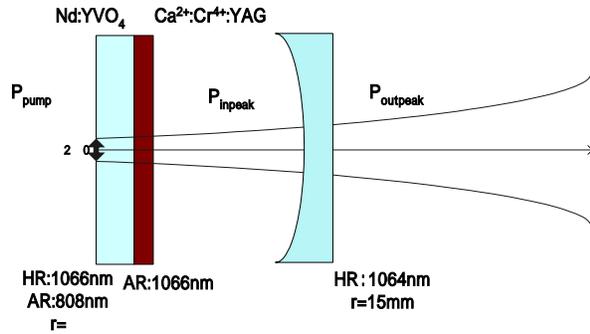


図 7

図 7 の共振器内の強度を求めるには以下の式を用いて表すことができる。

$$I_{inpeak} = \frac{P_{inpeak}}{\pi \omega_o^2}$$

$$P_{inpeak} = \frac{P_{outpeak}}{1 - R_M}$$

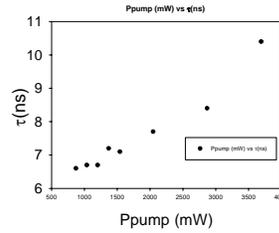
ω_o : 共振器のモード半径

また出力時の尖頭出力は

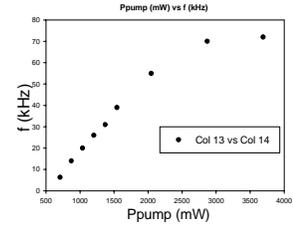
$$P_{out,peak} = \frac{P_{ave} \Delta T}{\tau}$$

$$\Delta T = \frac{1}{f}$$

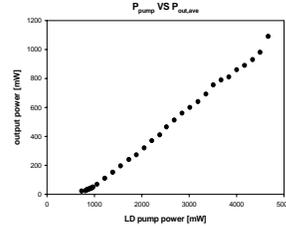
と表すことができ、出力の周期、パルス幅、平均出力から求めることができる。実際、測定するに当たってオシロスコープとパワーメーターを用いた。以下に測定した結果をグラフ 4,5,6 に載せる。



グラフ 4

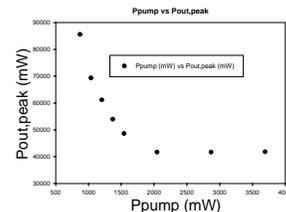


グラフ 5

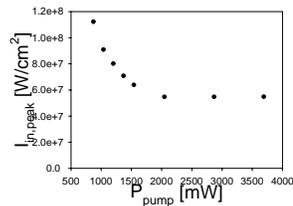


グラフ 6

よって尖頭出力はグラフ 7 のようになり、そのまま共振器内の強度も計算してグラフ 8 になった。



グラフ 7



グラフ 8

誘導ラマン散乱を引き起こすためには以下の式を用いることによって判断できる。

$$\gamma = g_{SRS} I_{inpeak}$$

$$R_1 R_2 e^{2\gamma d} (1 - L) \gg 1$$

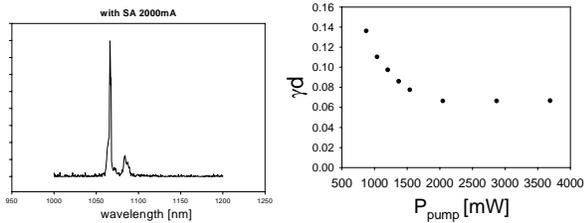
$$\gamma d \gg \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2 (1 - L)} \right)$$

g_{SRS} : ラマン利得係数 : $4.5 [\text{cm}/\text{GW}]$

計算して求めた共振器内強度にラマン利得係数をかけて求めた値にレーザー媒質の厚さ d をかけた値が 0.3 以上をとれば発振の可能性が出てくる(2)。

< 2 波長発振の可能性 >

スペクトルアナライザーを用いて出力レーザーの波長を測定した。その様子をグラフ 9 に載せる。今回の実験で目的としていた 1178nm の波長を取り出すことが出来なかった。その原因としては励起光の出力に比例してパルス幅が伸びているからである。その影響で共振器内の強度が下がっていることが原因である。

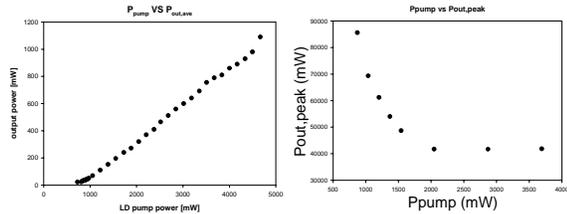


グラフ 9

グラフ 10

しかし、今回測定した d の値が約 2 倍の数値を取ることが出来れば誘導ラマン散乱閾値 0.3 に届き、発振の可能性があるといえる。(グラフ 9 参照)

< ビーム品質 >

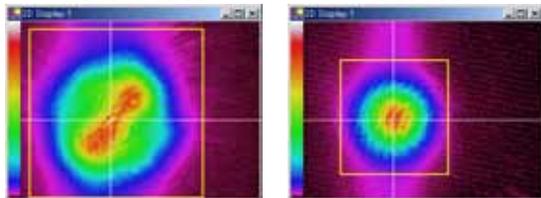


グラフ 11

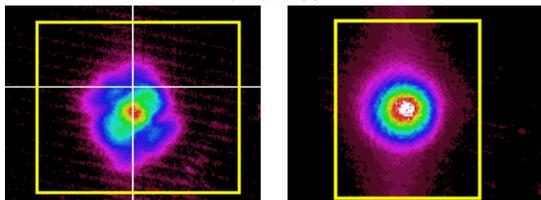
グラフ 12

without SA

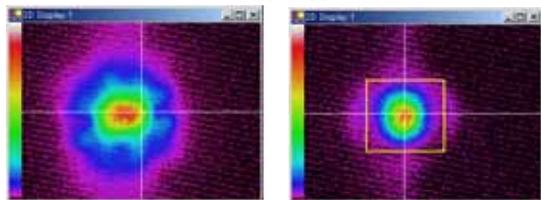
with SA



820mW



2050mW



4000mW

図 8

可飽和吸収体を使わずにNd:YVO₄のみで発振させた場合 (without SA) と可飽和吸収体を挿入して発振させた場合 (with SA) での出力をグラフ 11 とグラフ 12 にのせた。前者は連続波の出力で後者はパルス波の尖頭出力である。さらに励起光の出力が 820mW, 2050mW, 4000mW の際、それぞれの出力時のビームの形を CCD で測定して図 8 に載せた。

図 8 を見れば分かる通り可飽和吸収体を入れることでよりガウシアンビームに近いことが分かる。また、2050mW で可飽和吸収体を挿入した場合としない場合とで M-square を測定した。

	M_x^2	M_y^2
2050mW	2.21	1.76

without SA

	M_x^2	M_y^2
2050mW	1.26	1.27

with SA

可飽和吸収体を挿入した方が M-square の値が 1 に近いので数値的にもガウシアンビームに近いということが分かる。これは可飽和吸収体がビームの強度が高まるほどに吸収係数が下がることに起因する。例えば、高次モードの場合は強度が低いため可飽和吸収体に吸収されやすい。その結果強度の高いファンダメンタルモードが取り出される。結果的にシングルモードだけが発振されるということがいえる。このことから可飽和吸収体はモードフィルタとして扱うことが出来るということがわかった。

< 今後の予定 >

今回の実験での発振波長は 1066nm のみ取り出すことができ、1178nm の波長は取り出すことは出来なかった。その理由としてはまず出力のパルス幅が励起光の出力に比例して伸びてしまったことが上げられる。このことによって共振器内の強度が励起光の出力と反比例して下がってしまっている。原因は検討中である。また、出力ミラーの 1178nm 付近の反射率が低く強度が弱く発振できていない可能性がある。反射率を上げれば 1178nm の波長で共振器内の強度を高めて発振が出来るかもしれない。また励起時の調整を変える必要があるが媒質の厚さを増やすことによって利得を得るという方法も考えられる。

- (1) *A. A. Kaminskii, Ueda et al., Opt. Comm., **194**, 201-206, 2001
- (2) J. Domg et al, OPTICAL REVIEW Vol 12, No. 3 (2005)