

周期分極反転素子を用いたマルチワット波長変換の研究

道根百合奈

指導教員：米田仁紀

1. 序論

高出力の緑色レーザーはチタンサファイアレーザー励起光源や加工、ディスプレイなどの応用が期待されており、その小型化、高効率化が求められている。一般的にはNd、Ybなどの希土類イオン固体赤外レーザーの光を非線形光学効果により波長変換し緑色を得る手法が用いられている。波長変換効率はレーザー線幅に大きく影響される[1]ため、マルチワット出力では現在は発振線幅の狭いダイオード励起固体レーザーが多く用いられている。[2]しかし、これらのレーザーは高出力化にともなって熱レンズ効果や熱複屈折効果を補償するための大きな冷却機構を必要とするなど改善点がある。一方、ファイバーレーザーは、近赤外であるものの数10Wのものでも小型・空冷で出力できるほど簡易で、空間モードも原理的に単一光であるため、マルチワット級の波長変換が効率よくできれば小型な光源となりうる。

また近年、周期分極反転型の非線形光学結晶(PPLN、PPKTP)が開発されるようになり、KTPやLBOなどの複屈折結晶よりも高い非線形光学定数や損傷しきい値の向上、より長い相互作用長、ノンクリティカル位相整合が達成され、連続光(CW)発振の光でも効率よく波長変換が可能になった。しかし高出力化にともなって結晶内の温度上昇により熱屈折率効果や緑色吸収、2倍波が存在している状態での基本波の吸収などが起こり、それが波長変換光の出力を制限していることが知られている[3]。

そこで、本研究では、極端に発振周波数が狭窄化されていないファイバーレーザーと周期分極反転結晶を利用時の、高出力化で起きる変換効率低下メカニズムを明らかにし、新しい高効率変換手法の開発を目的として研究を行った。

2. Ybファイバーレーザー

表1には本研究で使用するYbファイバーレーザーのスペックを示す。発振線幅は分光器を用いて実測した。レーザーの出力と発振線幅の関係を図1に示す。

最大出力	32 W
中心波長	1064 nm
寸法	280(W)×18(H)×161(D) (mm)
発振線幅	0.1 nm (出力 12 W 時)

表1 典型的なファイバーレーザーのスペック

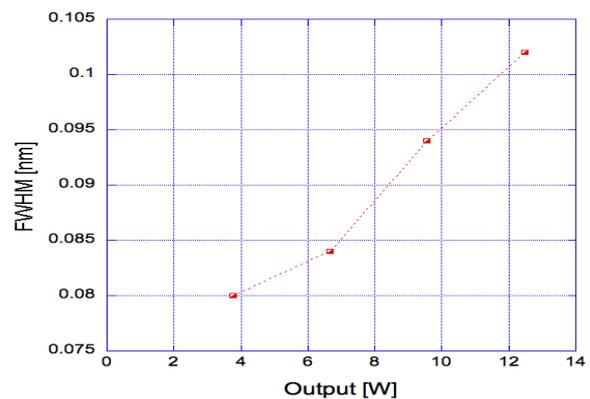


図1 出力と半値幅の関係

3. マルチワット波長変換時の問題

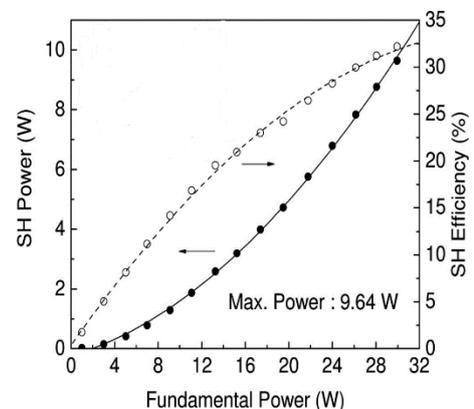


図2 基本波入力と波長変換出力および変換効率

図2は結晶への基本波の入力光と、波長変換光の出力及び変換効率を表している[5]。図より、入力光の強度が低いときには、波長変換効率は基本波の強度の2乗で上昇していくが、基本波の強度が上昇すると、変

換効率の上昇が飽和しているのがわかる。この原因としては、結晶内部での温度勾配による位相不整合、波長変換光と基本波が同時に存在しているときの波長変換光による基本波の吸収、熱レンズ・熱複屈折効果による位相不整合、などが考えられている。一般的なこれらの現象に対する変換効率改善策は、たとえばシングルパス波長変換の場合、結晶の温度制御、集光光学系のFナンバーの変更、結晶通過後の未変換の基本波光を複数の結晶に入射すること等がある。本研究でもはじめにこの手法に則って変換効率改善策を行った。

4. 一般的な変換効率改善手法

4.1 例：未変換光の利用

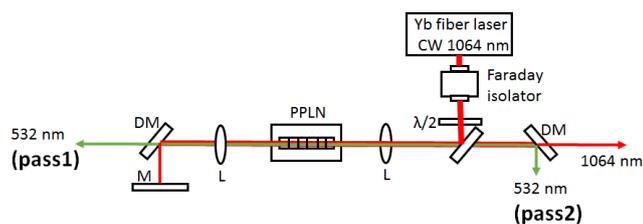


図3 ダブルパス波長変換

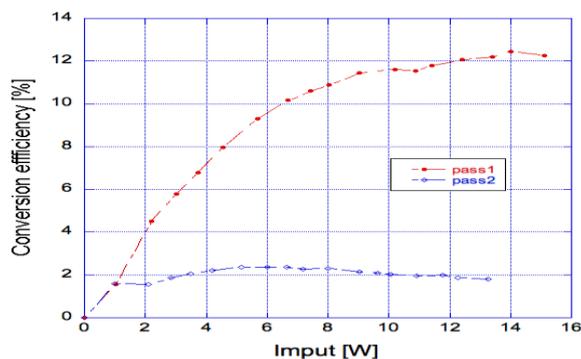


図4 基本波強度と波長変換効率

図3は、基本波を一度結晶に入射して (pass1) 緑色を出した後の未変換の基本波をもう一度結晶に入射させ(pass2)、波長変換させる光学系となっている。ダブルパス構成にすることで全体の変換効率改善を狙った。

図4はこの1パス目に発生した波長変換光と2パス目に発生した波長変換光の変換効率を表しているが、明らかに2パス目の効率が1パス目に比較し劣っているのがわかる。このとき考えられる原因としては、①1パス目結晶通過後の基本波の波面の乱れ ②結

晶内部での温度分布 ③基本波光のスペクトルの全てで波長変換が効率的に行われていない ことがある。この3点を調査し、原因の解明を行った。

4.2 波長変換効率低下の原因解明

①の、1パス目結晶通過後の基本波の波面の乱れについては、結晶通過前の基本波光と、結晶通過後の基本波を干渉させ、このときの干渉縞の歪みをみることで確認した。結果は図5に示したが、図4で変換効率の飽和が始まる基本波強度でも、干渉縞の歪みは観測されなかった。

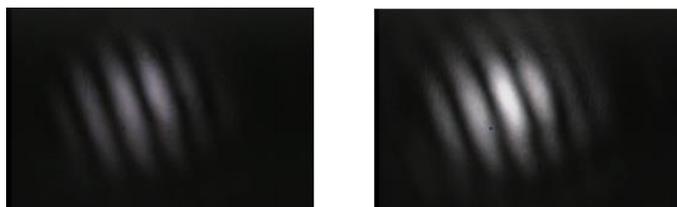


図5 干渉縞 (左：基本波出力3W 右：基本波出力13W)

②の結晶内部での温度分布は、2パス目の波長変換を1パス目とは異なる領域で行わせる光学系を組み、結晶内の温度勾配を緩和させることで確認した。これは図3の装置構成では1パス目と2パス目の基本波集光位置を変更することが原理的に不可能であるためである。結果を図6に示す。図より、2パス目変換効率低下の原因は結晶内の温度分布の影響ではないことがわかった。

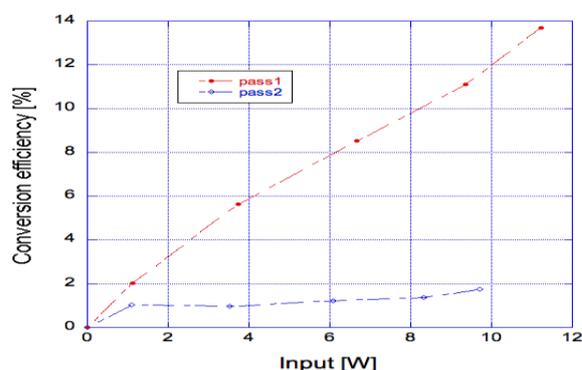


図6 基本波強度と波長変換効率

③基本波光のスペクトルの全てで波長変換が効率的に行われていないことは、結晶通過前の基本波と、波長変換光のスペクトルを計測し、その半値幅を比較することで判断した。結果を図7に示す。理想的な波長変換光の半値幅は、基本波をガウス型関数と仮定し、

測定された半値幅から見積もった。

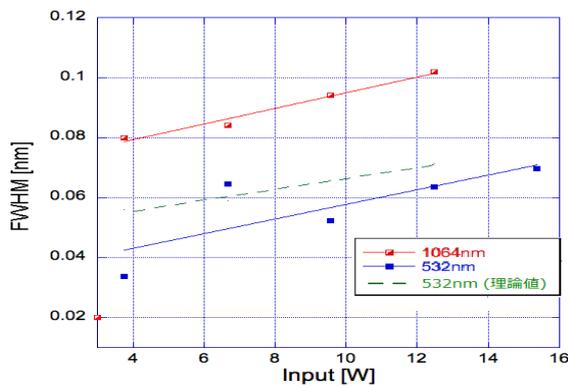


図7 基本波光と波長変換光の半値幅

図7からは、波長変換光の半値幅は理想的な半値幅よりわずかに狭いことが確認できた。つまり、図3の実験で2パス目の波長変換効率が上がらなかった原因は、基本波のスペクトルのうちよく波長変換される部分が1パス目の波長変換で使われて、2パス目では波長変換されない部分しか結晶を通過しないためであると考えられる。

5 角度分散型波長変換法

5.1 角度と波長の最適条件の決定

基本幅の幅広いスペクトルが原因で波長変換効率が低下していると確認できたので、いまは一部しか位相整合がとれていない基本波光のスペクトルを波長分離させ、角度をつけて結晶に入射することで、全スペクトルで波長変換を行わせるという手法をとることにした。そのためには、結晶の温度一定での角度と波長の最適条件を知る必要がある。

結晶の波長変換効率を決める要因(図8)には、基本波の波長、入射角度、結晶温度があるが、それぞれの軸はそれぞれに対して広がりをもっていて、3軸を同時に変化させながら最大グリーンを得るパラメータを探すのは不可能である。よって、①波長と結晶温度の関係、②入射角度と結晶温度の関係を調べ、これらの結果から間接的に入射角と波長の関係を導出することにした。

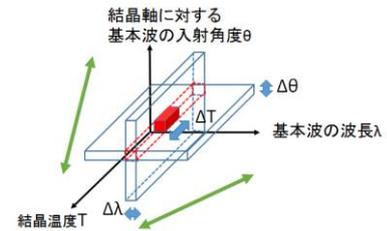


図8 結晶の波長変換効率を決定する要因

①の波長と結晶温度の関係については、光源に波長と波長幅を変化させることのできるものを使用して、結晶に基本光を入射し、結晶の温度を変化させながら波長変換光のスペクトルを測定することで調査した。

(図9)結果としては、この関係は $\Delta\lambda = \beta\Delta T|_{\Delta\theta=0}$ の線形関数で示されることがわかった。

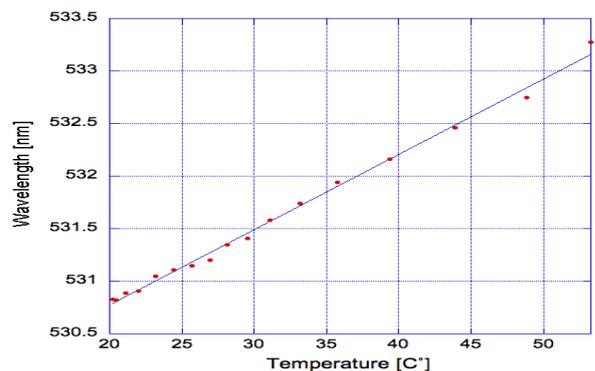


図9 変換光波長の温度依存性(基本波光の入射角度固定)

②の入射角度と結晶温度の関係については、Ybファイバーレーザーの線幅0.1 nmの幅の基本波光を、角度をつけて結晶に入射させたときに最大波長変換光を得る温度をそれぞれ測定した。(図10)これも線形的に変化していて、 $\Delta\theta = \alpha\Delta T|_{\Delta\lambda=0}$ の関数で示されることがわかった。

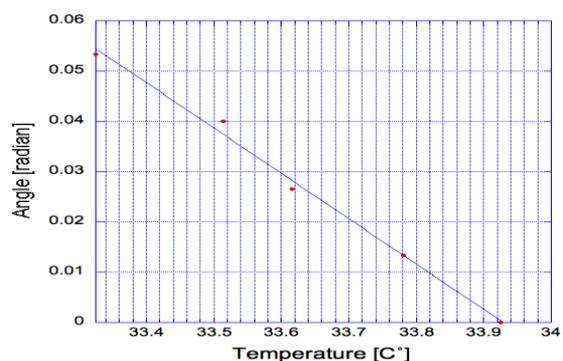


図10 入射角度の最適波長変換温度依存性(基本波光の波長固定)

たとえば測定②ならば入射角度を変化させると α の係数が変わる、高次の項が出てくる等の可能性も考えられるが、ごく微小な領域では線形近似できると仮定し、図9、10より、角度と波長の関係を求めた。これが図11で、入射角 $\theta = \alpha/\beta \times \lambda$ の関係式で表される。また、グラフの傾きより係数を求めた。(a/b = -1.26 [rad/nm])

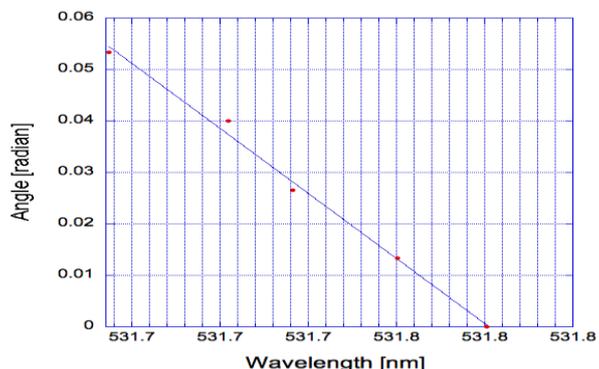


図11 角度 θ と波長 λ の関係

5.2 光学系の設計・原理実証実験

$\Delta \lambda = 0.1 \text{ nm}$ 、 $a/b = -1.26 \text{ [rad/nm]}$ より、 $\theta = \alpha/\beta \times \lambda$ の関係式から $\Delta \theta = -126 \text{ (mrad)}$ が求まる。この角度を達成できるように実際の光学系を設計を行った。(図12)

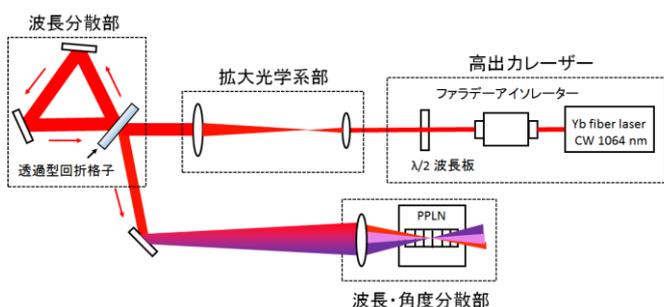


図12 実験装置構成

ファイバーレーザーの波長分散には透過型回折格子 (LightSmith compression grating, 1000 本/mm, 回折効率 94%) を利用した。回折格子の分解能の問題 ($\Delta \lambda/\lambda \sim 10^{-4}$ 以上必要) から、拡大光学系部のレンズでビーム径を拡大している。また、波長分散部から数 m の光路長を持たせることで、結晶前のレンズ位置で各波長に応じた入射横方向位置を取らせた。実際には縦方向ビーム径を考慮し最適結晶集光レンズと距離を実験により確認した。

5.3 結果

角度分散型波長変換法による結果を図13に示す。非波長・角度分散に比べて、波長・角度分散の場合は、10W 以上の入力で50%以上の変換効率の改善が見られた。

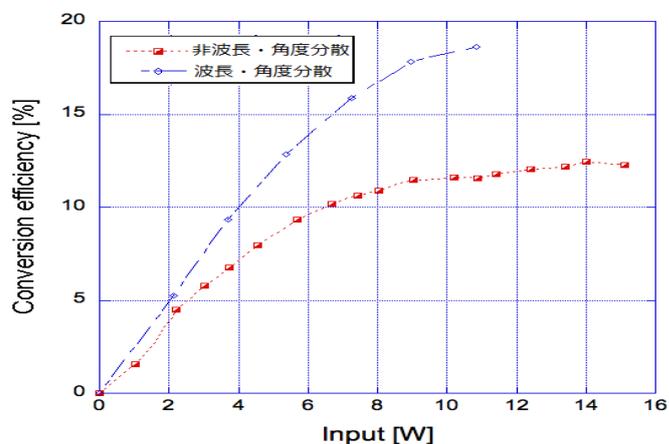


図13 波長変換効率の強度依存性

6. 結論

単一周波数でない CW ファイバーレーザーと周期分極反転波長変換素子における高出力化での低効率化のメカニズムを定量評価を行った。また、角度・波長分散光学系を利用した新しい波長変換手法の提案と設計方法を明確化 ($a/b = -1.26 \text{ [rad/nm]}$) し、原理実証実験により 1.5 倍の高効率化となる大幅な改善を確認することができた。

参考文献

- [1] 先端固体レーザー、 社団法人 レーザー学会編、第6章 波長変換技術、オーム社 (平成23年12月25日)
- [2] Ole Bjarlin Jensen, Optical Society of America (2009)
- [3] R. G. Batchko, G. D. Miller, In Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, (Optical Society of America, Washington, D.C., 1998), 12, 75 (1998)
- [5] G. K. Samanta, Opt. Lett. 34, 1561-1563 (2009)