

高輝度Yb:YAG固体レーザー技術に関する研究

Yb:YAGレーザーの波長変換法の開発

高出力紫外光発生用希土類カルシウムオキシボート非線形結晶の開発

大阪大学 大学院工学研究科 佐々木孝友、森勇介、吉村政志

1. はじめに

大阪大学において開発した新しい非線形光学結晶 $Gd_xY_{1-x}Ca_4O(BO_3)_3$ (GdYCOB) は、希土類元素の混合比を変えることで、結晶の複屈折が調整できる結晶である。この屈折率制御性によって、Nd:YAG レーザーの第3高調波発生（波長：355nm、third-harmonic generation, THG）においては、最も理想的な位相整合である非臨界位相整合条件が達成できることが分かっている。製造・加工の容易さや、化学的な安定性、光学的な基本性能に関しては、現在実用化している LiB_3O_5 (LBO) を凌駕する優れた特性を持っている。また、実効非線形光学定数は小さいが、Nd:YAG レーザーの第2高調波発生（波長：532nm、second-harmonic generation, SHG）においても同一方向でタイプ2非臨界位相整合ができることや、タイプ1条件でSHG光（360~420nm）が得られることも明らかになっている。本研究では、GdYCOBを用いた波長変換素子を開発し、高出力紫外光を発生させることを目的としている。また、大学での研究成果を民間企業に技術移転し、工業製品として実用化することを目指す。

2. 紫外光発生用非線形光学結晶の開発（フェーズ） - 研究目的と内容 -

GdYCOBは優れた基本性能を有しているが、高出力紫外光を発生させた時には、自ら発生した紫外光から光損傷が形成され、吸収によって熱位相不整合が生じることが分かっている。これにより、出力・効率が大きく制限されるといった問題に直面している。一方、結晶を高温に加熱して使用した場合、損傷発生と熱緩和過程が平衡状態を保つため、ある程度の抑制が可能となることを見いだしている。また、光損傷を抑制するためには、育成雰囲気中に少量の酸素を加える事が望ましい事も明らかにした。フェーズの研究としては、これら様々な条件からGdYCOBから紫外光を発生させた際の、位相整合特性を調査し、波長変換結晶としての複屈折の制御条件を確立させる。また、紫外光の吸収によって結晶が自己加熱する問題の対策として、結晶の組成勾配を利用した波長変換素子の原理実験も試みた。

3. 紫外光発生用非線形光学結晶の開発（フェーズ） - 研究成果 -

3.1 位相整合条件の温度依存性

GdYCOBの光損傷は、結晶加熱により緩和できることが分かっている。そこで、高繰り返しレーザーを用い、加熱したGdYCOBによる第3高調波発生を行った。結晶温度によって位相整合角度は変化するため、GdYCOB ($x=0.255$) 結晶の温度と第3高調波発生における位相整合角の関係について調べた。図1に示すように、結晶の温度上昇に伴って位相整合角が 90° に向かって変化する、つまりy軸方向にシフトしていることが明らかとなった。一般的にGdYCOBのような二軸性結晶では、y軸方向の複屈折が最も大きい。それゆえ、結晶を加熱すると複屈折が減少し、位相整合角がy軸に方向に向かうと解釈できる。Gdの組成比を $x=0.255$ から変化させた場合、図1と同じ曲線の形で条件が変化する。例えば、xの値を

増加させると曲線は左上の室温で 90° の点に向かって移動する。この結果を踏まえ、光損傷の抑制を目的として、結晶温度を上げて非臨界位相整合条件を満足させる条件が見積もれる。

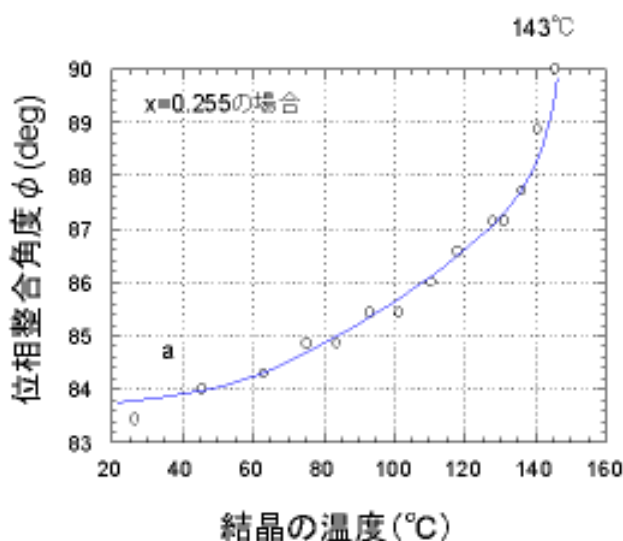


図1 GdYCOB 結晶 ($x=0.255$) の温度と xy 面内の位相整合角度の関係。 xy 面内の位相整合角度の変化を表している。結晶温度を上げると位相整合角は y 軸方向に変化する。

3.2 低酸素雰囲気での GdYCOB 結晶の育成

光損傷の抑制の観点から、GdYCOB 結晶の育成雰囲気には酸素が必要であることが明らかになった。ここでは、複屈折制御（位相整合制御）のために、大気中、Ar 中で育成した同一組成の原料からの結晶について、図1と同様の温度に対する位相整合角変化を調べた。その結果、図2に示すような関係が明らかになった。後で述べるように、結晶中に取り込まれる Gd 濃度が異なることも影響しているが、それ以上に酸素含有雰囲気で育成した結晶は複屈折が小さくなっていることが分かった。

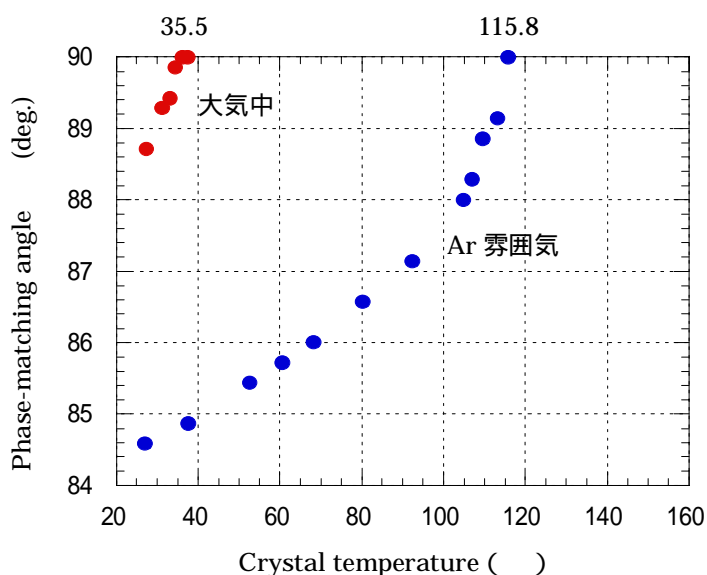


図2 異なる育成雰囲気で成長させた GdYCOB 結晶の結晶温度と xy 面内の位相整合角度の関係。

これは、結晶中の酸素欠陥が複屈折と関係していることを示すものである。非臨界位相整合を満足する Gd 組成については研究機関によって報告値が異なっているが、このような特性の影響を受けている

と考えられる。一方、結晶を大気中で育成する場合、育成温度は約 1500 になるため酸化しやすい Ir りつぼではなく、Pt りつぼを使用しなければならない。この時 Pt は使用限界温度に近くなるため、育成後にりつぼが大きく変形し、複数回の使用が困難となっていた。

そこで、次に Ir りつぼの使用が可能な低酸素濃度下において結晶育成を試みた。大気中で育成した場合は融液の粘性は低くなっており、液面対流の温度差で生まれるスポークパターンと呼ばれる色の違いが見受けられた。Ar 雰囲気で行った場合、このスポークパターンはほとんど観察できず、液の粘性も高くなっていることがわかった。また、Ar 雰囲気では融液を固化させた時に材料がやや茶色を帯びるのに対し、大気中では原料と同じ白色になる場合が多いこともわかった。これは、原料が融解した時に生じる酸素欠損に起因していると考えられる。

酸素濃度 0.5%混入した Ar 雰囲気の場合、Ar100%の雰囲気の時と同様の傾向が得られた。一方、酸素濃度を 1.0%に増やした場合、融液の状態は大きく変化し、大気中と同じような傾向を示すことがわかった。そこで、酸素 1%含有の Ar 雰囲気において、Ir りつぼを用いて結晶育成を行った。引き上げ速度 2.5mm/h、種結晶回転数 10rpm の条件で得られた結晶を、図 3 に示す。1064nm 光の第 3 高調波発生対する位相整合条件（非臨界位相整合温度）を調べたところ、図 4 に示すように大気中で育成した結晶と同様の傾向を示すことが明らかになった。



図 3 酸素 1%含有雰囲気中で育成した GdYCOB 結晶。

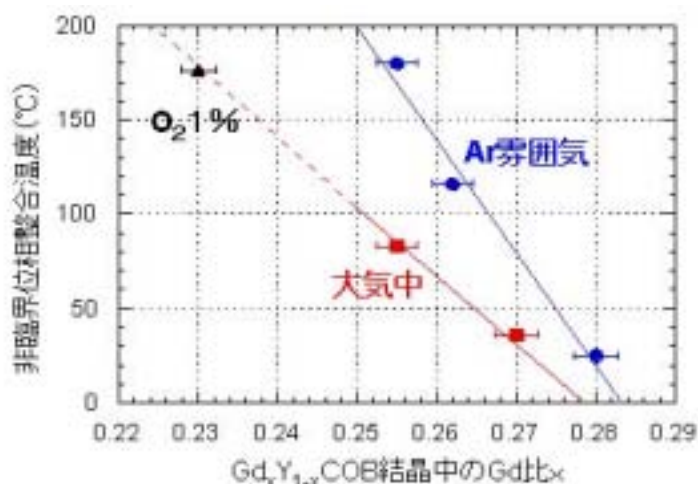


図 4 GdYCOB 結晶の 1064nm 光の THG に対する非臨界位相整合温度。

しかしながら、成長の初期段階で径が大きく成長した直後に、結晶が急速に細くなるといった問題が生じた。原因の一つとして、結晶の径が大きくなった時に、結晶自体が液面からの熱の逃げを妨げる蓋

として働き、液面付近の温度が上昇したと考えられる。融液対流が強くなった時に、この効果がより顕著に現れたと考えられるが、詳細については今後調べる必要がある。このことから、結晶成長が難しくなっており、高い光損傷閾値を持つ結晶は得るには至っていない。結晶径を重量変化による自動制御装置に切り替え、結晶品質を安定化させる必要がある。

3.3 熱位相不整合補償型波長変換素子

ここでは、紫外光による発熱の問題を抑制するために、結晶性の組成勾配を利用した新しい波長変換素子について述べる。位相整合する波長は組成と温度によって決定されるため、結晶内部の温度分布に対応した組成勾配を実現できれば波長変換効率の低下は防止できる。そこで、GdYCOB 結晶において、育成中に Gd と Y の組成比が変化することを利用し、発熱による温度分布と相殺できる新しい波長変換素子の開発を試みた。

得られた GdYCOB 結晶について ICP 原子発光分析で組成変動を調査したところ、育成原料の仕込み組成で Gd 割合 28.4%とした場合、結晶中の Gd 濃度は 25%程度と単結晶の方が育成原料よりも 3%程度 Gd が少なく、Gd は結晶に取り込まれにくいことが分かった。これは、 Gd^{3+} (0.938 Å)と Y^{3+} (0.900 Å)のイオン半径の違いによる偏析現象であり、より小さいイオンの Y^{3+} が取り込まれやすいことを示している。また、結晶の引き上げ方向に沿って Gd 濃度は減少し勾配が付くことが分かった。図 5 に示すように、その傾きは引き上げ速度により変化し、引き上げ速度を早くするほど勾配が緩やかになることが分かった。引き上げ速度をそれぞれ、(a) 1mm/h、(b) 2mm/h、(c) 4mm/hとした場合、Gd の組成の変化率は (a) 0.22%/cm、(b) 0.13%/cm、(c) 0.04%/cmであった。均一組成の結晶を得るという観点では、引き上げ速度を 4mm/h 以上にすることで組成変動は 100mm 長に対して<0.3%以下となる。実際の波長変換素子は 10~20mm 程度であり、それぞれ温度調整を行うため、図 4 の依存性からみても、素子の組成変動は問題にならない。

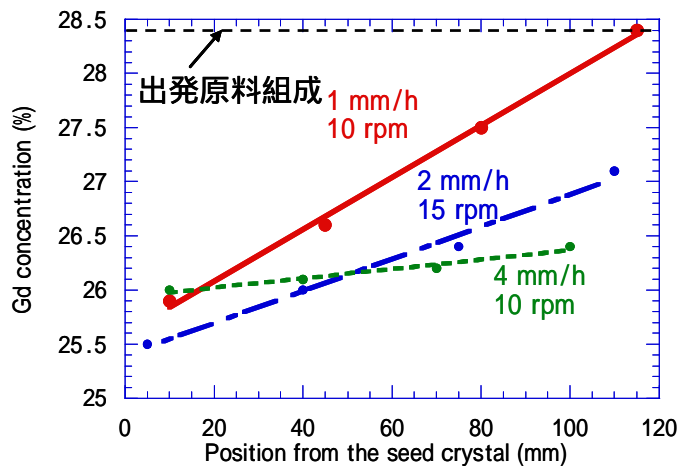


図 5 GdYCOB 結晶の異なる引き上げ速度に対する、結晶中の組成変化の様子。

紫外光を発生させる場合、入射から出射方向にかけて出力値は上昇する。それに伴い、結晶の温度は出射側に向けて高温となる。すなわち、図 4,5 から、形成される温度勾配に対して位相整合を満足させるには、入射側は Gd 濃度が高く、出射側の Gd 濃度が低くなるような素子を用意すれば良いことが分かる。引き上げ速度 1mm/h で得られた結晶から 15mm の素子を切り出し、組成勾配と温度勾配がマッチングする入射方向とその逆の場合の紫外光発生特性を調べた。得られた結果は図 6 に示すように、勾配がマッチングする方向で、より高い出力が得られた。ミスマッチングの方向では、瞬間的に高い値を取る

が、温度勾配が形成されると図に示すように出力が低下する。このように、結晶の組成勾配を有効に利用することで、より高い出力が得られる波長変換素子が得られることが分かる。

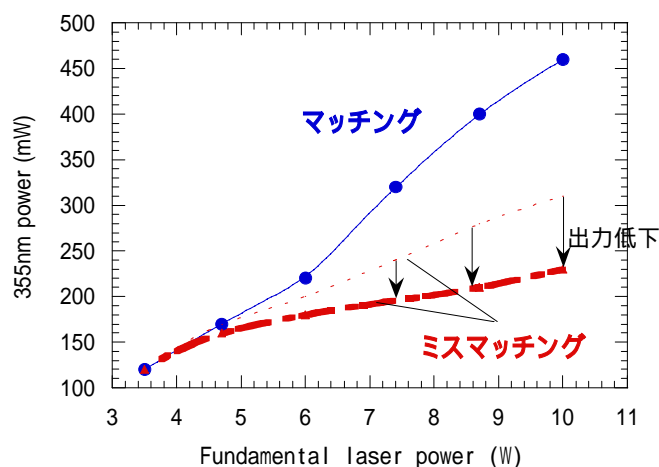


図6 GdYCOBによる紫外光発生特性。素子方向の組成傾斜と紫外光によって形成される温度勾配を効果的に利用した場合の出力の違いを示す。

4. 紫外域波長変換の高出力化（フェーズ） - 研究目的と内容 -

GdYCOB結晶を用いて、高出力紫外光源の開発を行う。当初の計画として平均出力10Wを得ることを目的としたが、光損傷による局所的な発熱により、高繰り返しレーザーを用いた場合、2W出力程度で熱クラックによる破壊が起きることが明らかになった。本研究では、主に光損傷の解決に向けた様々な取り組みを行ってきた。結果としては、1) 結晶を高温に加熱して用いる、2) 酸素含有雰囲気中で結晶育成を行う、3) 異相を含まない单相焼結体を育成原料に用いる、3) 溶液に少量のZnOを添加することなどに効果があることを見いだした。しかしながら、いずれの場合も紫外光強度が $0.1\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上になると、光損傷による紫外光吸収が避けられないため、高出力を得るためにはレーザー口径を大きくして光損傷閾値以下で用いるか、小型でポータブルな低出力光源の応用に特化することが望ましいことが分かった。本研究では、この考え方に基づいて、500mW出力のレーザーの製品化、さらにはポータブル紫外光源の試作に至っている。

5. 紫外域波長変換の高出力化（フェーズ） - 研究成果 -

5.1 育成原料の高純度化

電子スピン共鳴法を用いてYCOB結晶の欠陥評価を行ったところ、酸素含有雰囲気中で育成しただけでは、欠陥を示すピークが消失しないことが明らかになった。原料に用いる B_2O_3 は吸湿性を持ち、他の原料に比べて融点が低い。そのため、原料の秤量や混合時に組成ずれを生じると考えられる。また、焼結反応や育成時においては成分の蒸発による組成ずれも生じる可能性を持つ。そのため、雰囲気を最適化させても、原料の定比組成からのずれによって、 Y^{2+} などが含まれる可能性が明らかになった。

次に、GdYCOB結晶の原料準備から育成に至る過程で生じる定比組成ずれの抑制を試みた。 B_2O_3 などの原料成分は強い吸湿性であるため、市販品の原料にはかなりの水分が含まれていると考えられる。そこで、結晶原料の仮焼きを行い、低湿度環境下で原料の秤量、混合を行った。念のため、吸湿による B_2O_3

成分の損失を防ぐため、定比組成(化学量論比)に少し B_2O_3 を加えた原料を準備した。焼結を行った後、得られた粉末の X 線回折を調べた。従来の方法に比べて、不純物相のピークが大幅に減少しており、さらに焼結反応を複数回繰り返すことでより改善する傾向が見られた。得られた YCOB 原料を用いて結晶育成を行った。育成雰囲気は、従来との比較のため Ar 雰囲気で行った。

この結晶を用いて、光損傷耐性の評価を行った。産業界で需要の高い高繰り返しレーザー光(62.5kHz)を y 軸方向、x 軸偏光(GdYCOB 結晶での紫外光発生方向と、その偏光方向)で照射し、その透過率の強度依存性を調べた。レーザー光の繰り返し周波数が高くなると、損傷の起こり始めの強度(閾値)が低下していることも分かった。10Hz の紫外光照射実験の場合では数 GW/cm^2 レベルで低下が始まるのに比べて、62.5kHz の紫外光照射では $0.1MW/cm^2$ レベルに低下していた。図 7 に測定した結果を示す。

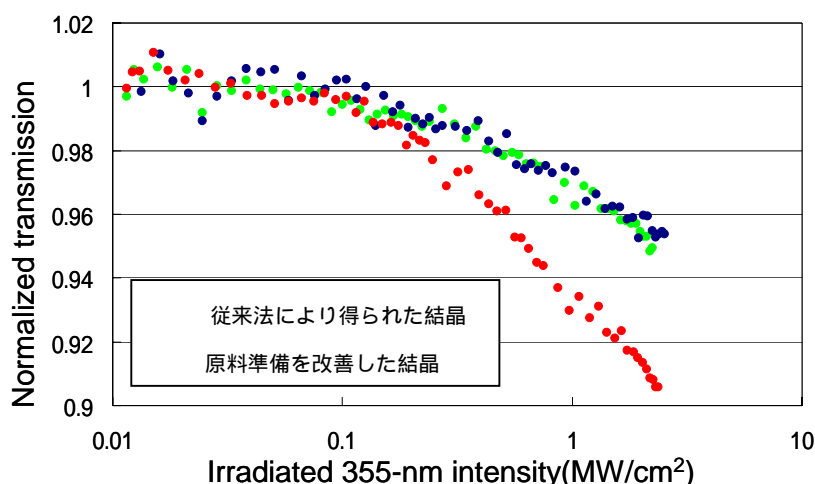


図 7 YCOB 結晶の 355nm 紫外光に対する透過率強度依存性(低出力光照射時を基準に規格化)

図から明らかなように、今回育成した結晶においては透過率の低下が小さく抑えられていることが分かった。すなわち、原料の準備段階に含まれる水分や、それによって生じる定比組成からのずれ、焼結反応で残っている不純物相などが、結晶の光損傷特性に大きく影響を与えていることが分かった。しかしながら、ここでの対策は光損傷の本質的な解決には至らなかった。初期目標の高出力紫外光を得るためには、数百 MW/cm^2 程度までは損傷の生じない結晶が必要となる。YAG や KTP で行われてきたような、Ce 等の添加物による損傷耐性の改善が考えられるが、元素、条件の探索には長期間を要するため、短期間での開発を行うことを目標として、粉末試料による光損傷評価を検討した。粉末状の試料に紫外レーザー光を照射し、グレイトラック損傷が生じているかどうかを目視により判断するため、この方法は定量性に欠ける実験となるが、探索的な研究を行う場合には有効な手段と考えた。

10Hz 動作の Q スイッチ Nd:YAG レーザーを用い、第 4 高調波である 266nm 紫外光を照射光源とした。結晶を砕いて粉末試料を用意し、これに紫外光を照射したところ、茶色に着色したグレイトラックが確認でき、さらに時間緩和により色が消失することが分かった。次に、どの段階で光損傷の原因が含まれているかどうかを判断するため、同様の実験を焼結体について行った。これは、焼結体の段階で評価できた場合に、改善に向けて添加する元素、添加量などを系統的に調査できるといった展開も想定して行った。結果としては、結晶に比べて着色の程度は薄いものの、グレイトラックが生じていることが明らかになった。このことから、光損傷の原因は結晶の成長条件(育成速度、雰囲気等)よりも、焼結体の品質そのものにあるのではないかと推察に至った。また、焼結体は大気中で反応させているが、酸素の無い雰囲気では処理すると着色の程度が濃くなることから、やはり酸素の不足が影響していると考えら

れる。さらに、 $Y_2O_3(Gd_2O_3)$, $CaCO_3$, B_2O_3 の出発原料の試料に対して同様のレーザー照射実験を行ったところ、希土類の原料のみ光損傷が生じていることが分かった。これは、原料の純度に依らず生じ、時間緩和することから、各原料の酸素欠陥が原因と考えられる。希土類原料と育成した結晶の光損傷が直接関連するかどうかは今後詰める必要があるが、少なくとも希土類原料の慎重な選択と熱処理、それらを使った高品質な焼結体の作成が、光損傷の根本的な解決につながるものと期待できる。

5.2 不純物添加による光損傷耐性の改善

GdYCOB 結晶は、図 7 から分かるように $0.1MW/cm^2$ 以上の $355nm$ 紫外レーザー光で光損傷を生じ、紫外光に対する透過率が低下する。また、粉末にした単結晶、焼結体原料粉末においても同様に光損傷(ここでは着色)が生じることが分かっている。そこで、焼結体原料粉末においても光損傷が生じる点に着目し、焼結体に種々の金属酸化物を添加し、損傷耐性の改善に有効な添加物の探索を行った。具体的には、焼結体粉末(YCOB 原料)に紫外光(波長 $266nm$ 、パルス周期 $10Hz$)を照射し、その着色の程度を比較した。

Yb_2O_3 , Nd_2O_3 , CeO_2 , Ti_2O_3 , TiO , WO_3 , Nb_2O_5 , ZnO を数 wt%添加した焼結体の着色を比較したところ、 ZnO 以外の元素は無添加原料に比べて逆に着色が濃くなることがわかった。 ZnO においては $5wt\%$ 以上で着色が抑制され、 $10wt\%$ の添加までその効果を確認した。無添加原料は $1MW/m^2$ の照射ではっきりと着色が確認されたのに対し、 ZnO を添加した原料では同じ強度でかろうじて着色が観察できる程度になっていた(図 8)。すなわち、 ZnO は光損傷の抑制に対して有効な元素であると考えられる。参考までに、 ZnO 単体粉末に紫外光を照射すると黒色に着色することが分かっている。



(a) 添加物の無い YCOB 焼結体



(b) ZnO を添加した YCOB 焼結体

図 8 YCOB 焼結体の紫外光照射による着色の様子。

次に、 ZnO を添加した YCOB 結晶の育成を行い、その光損傷耐性を評価した。 ZnO を添加した原料は蒸発が極めて激しくなるために、 $10wt\%$ 濃度の添加では良質な結晶が得られなかった。Cz 法を用いて、引き上げ速度 $1mm/h$ 、回転速度 $10rpm$ 、窒素雰囲気条件で、 ZnO を $5wt\%$ 添加した原料から透明な単結晶(一部白濁領域を含む)が得られた。結晶の透明領域を粉砕して粉末試料を準備し、焼結体と同様の光損傷評価を行ったところ、約 $6MW/cm^2$ 以上で薄い着色が確認できる程度であった。すなわち、育成した結晶においても、無添加の結晶に比べて可視領域での損傷耐性が改善したものと考えることができる。

一方、結晶組成を ICP-AES により測定したが、期待に反して Zn 元素は検出できなかった。結晶を構成している Y と Ca の比については、図 9 に示すように ZnO 添加量の多い原料から育成した結晶ほど、理想比(化学量論比)である $1:4$ に近づいていることがわかった。従来の結晶はほとんどが Ca 過剰の $1:4.2$ 程度になっており、この傾向は初期原料中の Ca の割合を少なくした場合にも見られていた。ロシアの研究者は、YCOB 中の Y^{3+} と Ca^{2+} はイオン半径が近いためにお互いのサイトに部分固溶しており、この結果 O^{2-} イオンの欠損が生じると報告している。このことから、本結果は原料中に ZnO を添加するこ

とで、化学量論比である理想組成比に近い結晶を得ることができるようになり、その結果光損傷耐性を改善したものと考えられる。具体的な ZnO の作用については明らかになっていないが、原料に添加することの効果は確認できたと考えられる。

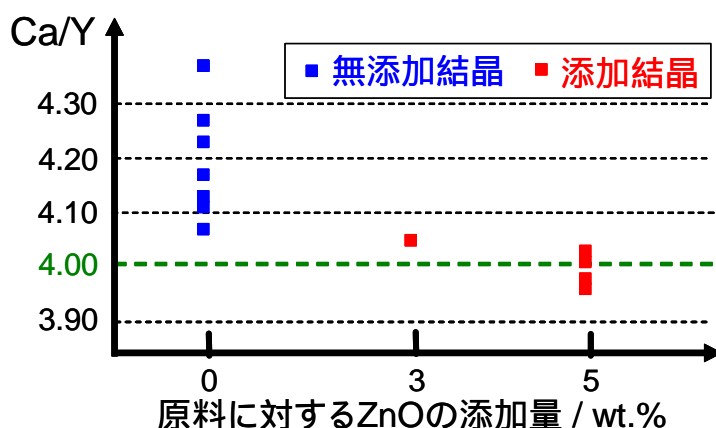


図9 ZnO を添加した原料から育成した YCOB 結晶中の Ca/Y 組成比。

次に、GdYCOB 結晶についても同様に原料に ZnO を添加し、さらに酸素を 1%混入した Ar 雰囲気中で結晶育成を行った。YCOB 結晶の場合と異なり、5wt%の混入の場合では結晶が白濁し、良質なものを得ることができなかった。2wt%で育成した結晶に関しては、図 10 に示すような透明な単結晶を得ることができた。この結晶の光損傷耐性について調べたが、図 7 に示したものと閾値に差は見られなかった。



図 10 ZnO を 2wt%添加した育成原料から得られた $Gd_xY_{1-x}COB$ 結晶 ($x=0.25$)。

光損傷に関しては様々な取り組みを行ってきたが、根本的な解決には至っていない。それゆえ、高出力を得るためにはレーザー口径を大きくして光損傷閾値以下で用いるか、小型でポータブルな低出力光源の応用に特化することが望ましいことが分かった。

5.3 モノリシック波長変換素子による紫外光発生

紫外光発生としては低出力用小型光源への応用を見据え、オプティカルコンタクトによるモノリシック波長変換デバイスを試作し、その光学特性を評価した。素子の組み合わせとして GdYCOB-SHG と GdYCOB-THG が可能であるが、SHG 部の変換効率が低いことが分かったので、KTP-SHG との組み合わせを評価した。本研究は、ネオアーク(株)との共同研究により実施した。

355nm紫外光は、基本波である1064nm光から1つ目の非線形光学結晶でSHGを行い、次の2つ目の結晶で基本波とSH光の和周波混合を行うことにより発生させる。一般に、2つの非線形光学結晶は結晶温度や集光条件を独立に調節できるように一定の距離を隔てて配置されるが、紫外レーザーの小型化に障害と

なるばかりか、光軸ずれに伴う信頼性低下の原因ともなり得る。そこで、紫外光発生 of 新しい試みとして、潮解性がなくモノリシック化に有利なGdYCOBとKTPをオプティカルコンタクトによって一体化させ、1つの素子でTHGを行うモノリシック波長変換素子を試作した。

GdYCOBはNCPMでのTHGが可能で、高い波長変換効率と広い角度許容幅が得られる。一方、KTPは大きな非線形光学定数と広い温度許容幅を有している。両者は、光損傷による出力の制約はあるものの、潮解性が無いため常温でも使用でき、小型紫外レーザーの構築には適していると考えた。この2つの組み合わせは、位相整合条件が互いを補うように、すなわち温度に対してはKTP、角度に対してはGdYCOBが広い許容幅を示すため、一体化した素子として優れた安定性を実現することが期待できる。また潮解性がなく加工性に優れているため、高精度の研磨を行いオプティカルコンタクトによるモノリシック化が可能と考えた。

紫外光発生用モノリシック波長変換素子 ($4 \times 4 \times 15 \text{mm}^3$) を図 11 に示す。GdYCOB と KTP の長さはどちらも 7mm である。GdYCOB の位相整合は type-1 であるため、KTP と GdYCOB の間には偏光方向の調整のために水晶波長板 (厚さ ~ 1mm) を挿入した。これら 3 つの光学素子をオプティカルコンタクトで接着し、モノリシック波長変換素子として一体化させた。素子界面の透過損失は測定誤差として無視できる程度に小さくすることができた。

基本波に高繰り返し of NdYVO₄ レーザーを用いて、モノリシック波長変換素子のTHG特性を取得した。基本波レーザーの波長は1064nm、パルス幅は32ns、パルス繰り返し周波数は60kHzである。モノリシック素子の特性と共に、SHG用とTHG用の結晶を分離して配置し、各結晶で最適な動作条件に設定する一般的な系でのTHG特性も取得した。分離配置の構成では、基本波パワー3.2Wに対して62mW出力が、モノリシック波長変換素子では49mWの第3高調波出力が得られた。基本波から紫外光への波長変換効率として、分離配置で1.9%、モノリシック波長変換素子では1.5%が得られた。変換効率ではわずかに劣るもの、モノリシック波長変換素子がTHGに要する体積は分離配置の6分の1以下であることから、紫外レーザーの小型化に有効で、実用的な紫外出力が得られることを確認できた。GdYCOBのTHGはNCPMであるため、結晶を長くすることで効果的に波長変換効率が改善される。GdYCOBの長さを19mmにして、モノリシック波長変換素子のTHG特性を測定した。測定結果を図12に示す。基本波パワー3.2Wに対して106mW (波長変換効率3.3%)、基本波パワー10Wに対して452mW (波長変換効率4.5%) の紫外出力が得られた。一般に第3高調波の発生には厳密な調節が要求されるが、モノリシック波長変換素子では、簡単な調節により実用的な紫外出力を得ることができた。

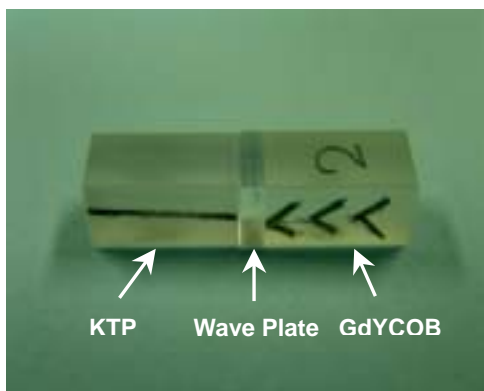


図 11 355nm 紫外光発生用モノリシック波長変換素子。

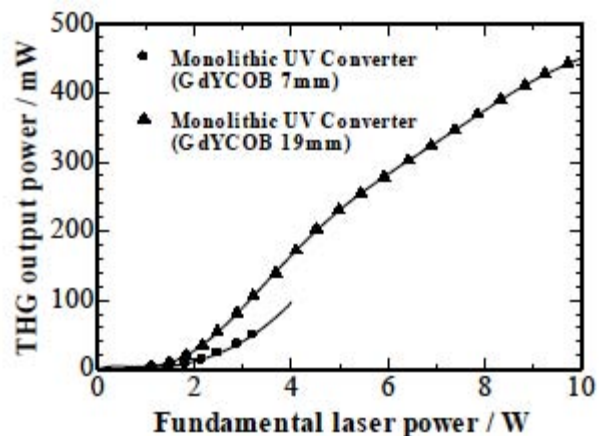


図 12 モノリシック波長変換素子を使った 355nm 紫外光発生特性。

6. 特許取得内容

GdYCOB に関して、下記の 4 点の特許申請を行った。

1. 特許の名称： 非線形光学結晶とその製造方法
出願日： 平成12年度（2001年1月26日出願）
出願番号： 特願2001-19173
発明者： 佐々木孝友、森勇介、吉村政志、古屋博之
内容： 3. 3 で述べた、結晶内の組成勾配を利用した高効率波長変換素子。

2. 特許の名称： 波長変換方法と温度安定型波長変換素子
出願日： 平成13年度（2002年1月24日出願）
出願番号： 特願2002-16193
発明者： 佐々木孝友、森勇介、吉村政志、吉田國雄、加藤冽、梅村信弘
内容： GdYCOBの屈折率温度依存性のデータから、Nd:YAGレーザーのSHGにおいて温度位相不整合しない安定素子を提案したものの。

3. 特許の名称： 希土類・カルシウム・オキシボレート系結晶とその製造方法
出願日： 平成16年度（2004年3月26日出願）
出願番号： 特願2004-093899
発明者： 佐々木孝友、森勇介、吉村政志、スリニヴァサン・プラハディスワラン、首藤豊、桑原涼、久湊直人
内容： 5.2で述べた、GdYCOB結晶の光損傷耐性を向上させる技術に関するもの。

3. 特許の名称： UVレーザー発生装置
出願日： 平成17年度（2005年10月3日出願）
出願番号： 特願2005-289932
発明者： 佐々木孝友、森勇介、吉村政志、波多野智、伊藤聡
内容： 7で述べるパームサイズのペン型紫外レーザー光源に関するもの。

7. 今後の計画

5.3 で開発したモノリシック素子を有効に利用し、図 14 のようなパームサイズでフレキシブルなペン型紫外光源の開発を試みている。本取り組みについても、ネオアーク（株）との共同研究により実施している。通常、シングルモードの光ファイバーにて紫外光を伝搬させようとする、端面で光損傷が生じる問題を抱えている。一方、マルチモードファイバーで紫外光を伝搬させた場合、損傷は避けられるが、モード品質が低下するため、レーザーの集光性能が悪くなるという問題を有している。本方式は、基本波の赤外パルス光をファイバー伝送させ、その後でモノリシック波長変換素子によって紫外光を得る方式であり、ウォークオフの無い NCPM によりビーム品質の良好な紫外光の発生が期待できる。

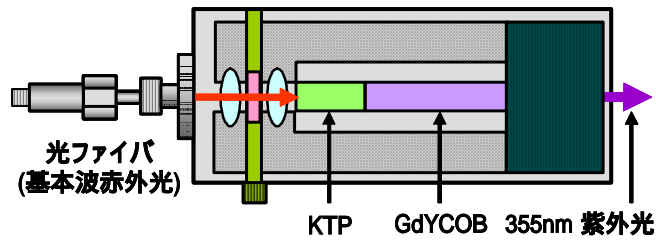


図 13 ペン型紫外レーザー光源の内部構成

基本波レーザーはファイバー伝送中に偏光が回転し、波長変換に最適な直線偏光が得られなくなる。本方式では 1/4 波長板を挿入し、楕円偏光を制御し、KTP、GdYCOB にとって適切な偏光が得られるようにしている。その結果、KTP と GdYCOB の間の 2 波長波長板が不要になることも分かった。現在、図 14 の光源を試作し、50mW 出力が安定して出ることを確認している。ファイバー伝送中の基本波レーザーの品質劣化を防ぐことで、さらに高出力が期待できる。今後は、この小型紫外レーザーを使ったレーザー微細加工機、マーキング装置などを開発する予定である。



図 14 KTP-GdYCOB モノリシック波長変換素子を用いたペン型紫外レーザー。
ネオアーク（株）との共同研究にて製作。