レーザー解説

レーザー核融合におけるハイパワー 3 倍高調波変換

實 野 孝 久*

(1992年 3 月 5 日 受理)

Third Harmonic Conversion in High Power Glass Laser for Fusion

Takahisa JITSUNO*

(Received March 5, 1992)

This paper deals with the third harmonic conversion technology on the high power glass laser for fusion application. The details of the fabrication and alignment procedures of a 36cm diameter segmented KDP crystal cell with an index matching fluid, and the energy monitor system for third harmonic light without distortion on the beam patterns are described. The conversion efficiency from $1.05\ \mu\text{m}$ to $0.35\ \mu\text{m}$ was found to be $60 \pm 10\%$ for 12 beams.

Key words: Third harmonic conversion, High power glass laser, Laser fusion, KDP crystal, conversion efficiency, Energy monitor system.

1. はじめに

最近の非線形光学の進歩は著しく、広いパワーレベル・広い波長範囲で波長変換が可能となっている。最近の話題となっている半導体レーザーなどの低いパワーレベルでの波長変換などは新しい方向であるが、ピークパワーの極めて高い大口径のレーザーにおける高調波発生も困難な技術である。本稿では核融合実験用ガラスレーザーにおける大口径ハイパワー波長変換技術を紹介する。

2. ハイパワー波長変換

本節ではレーザー核融合用ガラスレーザーの使用目的と必要とされる性能について簡単にふ

れ、大阪大学レーザー核融合研究センターの激光XII号ガラスレーザーを例として、使用されている波長変換技術について述べる。

2.1 レーザー核融合

レーザー核融合では、燃料である重水素(D)と三重水素(T)を閉じ込めたカプセル(ターゲット)を強力なレーザー光で照射し、噴出するプラズマの反作用により燃料を超高密度・高温度に圧縮(爆縮)して、核融合反応を圧縮コアの内部で発生させる。照射するレーザー光のターゲット上での分布や、ターゲットそのものに不均一があると爆縮コアの形が変形し、コアの温度と密度が低下するため、燃料の点火条件を得るために必要なレーザーのエネルギーが大

*大阪大学レーザー核融合研究センター(〒565吹田市山田丘2-6)

*Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565)

幅に増加する。このため、ターゲットの外側に外球を設けてその内面にレーザー光を照射し、発生する X 線を用いてターゲットを照射する間接照射方式が考案された。この間接照射方式では、レーザー光は外球内面の高密度プラズマを加熱する必要がある、プラズマの高密度領域まで到達し得る短波長レーザー光が必要となってきた。また、直接照射方式において、強力なレーザー光とプラズマとの相互作用により発生するエネルギーの高い高速電子の発生を抑制するためにも、短波長のレーザーが適している。このような理由で、世界の核融合実験用レーザー装置はすべて短波長のエキシマレーザーか¹⁾、あるいは近赤外領域のガラスレーザー光を波長変換により短波長にして使用している^{2,3)}。

2.2 核融合用ガラスレーザー装置

核融合実験には短いパルス幅(~ 3 ns)で大きな出力エネルギー(10~100 kJ)を有するハイパワー(50~100 TW)のレーザー装置が必要であり、Ndを含有したレーザーガラスを媒質とするガラスレーザーが主として使用されている。レーザー光を増幅する増幅器には、非線型屈折率の小さい燐酸ガラスのロッドまたはディスクと、これを光励起するフラッシュランプが組み込まれている。このフラッシュランプにキャパシターバンクに蓄えたエネルギーを300 μ s程度の時間で放電することにより、レーザーガラスを光励起している。増幅されるレーザー光はレーザーガラスの利得の中心波長に合わせるため、YLF(Yttrium Lithium Fluoride)結晶を用いたモードロッカー Q スイッチ発振器により発生される。レーザーのパルス幅は発振器の動作範囲(100 ps $\sim$ 1 ns)で発生するガウス型パルスと、波形成形器で合成される任意の形の波形が使用可能である。前置増幅器列で増幅されたレーザー光は、ビーム分岐部で反射鏡により12本に分割された後、ターゲットチェンバーまでの各ビームの光路長差を補正した上で主増幅器列に入射する。主増幅器列にはロッドおよびディスク型の増幅器と、ビーム径を増大しながらビー

ムパターンの回折による劣化を防止するためにイメージ転送を行う空間フィルター、後段からの反射光がシステムを逆進することを防止するファラデー回転子などが配置されており、レーザー光はmJレベルからビーム当たり ~ 2 kJまで増幅される。増幅器列の最終空間フィルターの出口でレーザー光の直径は約35 cmであり、ビームはこのまま各ビーム4枚のターニングミラーによりターゲットチェンバーまで導かれる。最終ミラーによりターゲットの中心に向かうように方向を調整されたビームは、ターゲットチェンバー上の集光レンズの直前に置かれた波長変換用KDP結晶により、2倍または3倍高調波(波長 $\lambda = 0.53$ または $0.35 \mu\text{m}$)に変換される。波長変換されたレーザー光は大口径の非球面レンズによりターゲット上に絞りこまれる。ターゲットの直径は0.5 $\sim$ 1 mmで、レーザー光をできるだけ均等に照射するため、ターゲットは集光ビームに内接する位置に置かれる。レーザーシステムの全長は発振器からターゲット中心まで約280 mあるため、僅かのビームの指向性の変化でもビーム位置は大きくずれてしまう。そこでシステム内のビームの各折り曲げ点では、反射鏡を透過する光を使ってビームの位置を検出し、所定の位置からずれている場合にはその上流のミラーを調整するレーザーアライメントシステムが設置されており、集光部にもターゲットからの反射光の方向が、入射光の指向性の誤差により変化することを利用した集光アライメントシステムが設置されている。これらのアライメントシステムにより、KDP上でのビームの方向(角度)変動はアライメント終了時で $\pm 10 \mu\text{rad}$ 以内、24時間以内での安定性 $\pm 50 \mu\text{rad}$ 以内と言う良好な値となっている。また、KDP結晶を用いて高い波長変換効率を得るためには、光軸に対して結晶を高い精度で設置しなければならない。KDP結晶では結晶の厚みと使用するレーザー光の強度により定まる許容角度(通常30 $\sim$ 60 μrad)以内に結晶セルの角度を調整する必要がある、低エネルギーのレーザーショットを用いて調整が行われている。

3. 波長変換技術

核融合用ハイパワーガラスレーザーの高調波発生には、大型の結晶を製作・加工できるKDPが非線形光学結晶として使用されており、結晶セルと屈折率整合液を使用するウェットセル方式と、屈折率整合液を使用しないドライセル方式がある。本節では激光XII号ガラスレーザー装置に使用されているウェットセル方式の詳細を紹介する。

3.1 高調波発生の原理

KDPのような中心対称性のない原子配列の結晶では、強力な電磁波が伝播すると結晶内に偏った分極を生じる。この分極のフーリエ成分として、結晶内には入射波と異なった周波数の波が複数存在することになる。これらの結晶中を伝播する波の相互のエネルギーのやり取りを記述するのが非線型相互作用の基礎方程式である⁴⁾。高調波発生を記述するためには同一方向に進む $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ の3つの波を考え、

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

であるとして、その電界を E_1, E_2, E_3 で表すと、

$$dE_1/dz = -\gamma_1 E_1 - ikE_3 E_2 \exp(-i\Delta kz) \quad (1)$$

$$dE_2/dz = -\gamma_2 E_2 - ikE_3 E_1 \exp(-i\Delta kz) \quad (2)$$

$$dE_3/dz = -\gamma_3 E_3 - ikE_1 E_2 \exp(-i\Delta kz) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_3 - k_2 - k_1 \\ k_i &= d_{\text{eff}} \omega_i (\mu_0 / \epsilon_i)^{1/2} \end{aligned}$$

d_{eff} : 非線形光学係数, γ : 損失

で表される。これらの式から明らかなように、 $\Delta k = 0$ の時に相互作用が最も効率よく行われることが判る。KDP結晶は入射光の偏光方向に対する複屈折と、波長に対する屈折率の色分散を持っており、これらをうまく組み合わせると使用する波長(基本波と高調波)に対して $\Delta k = 0$ となる位相整合条件を得ることができる。また、相互作用は結晶の厚みにも依存するため、使用

するレーザー光の強度により最適の厚みを決定する必要がある。この目的のため、上記の微分方程式を計算機上で解くことにより、結晶の厚みや偏光角を変えた場合の変換効率を理論的に求めることが出来る。

3.2 波長変換方式

KDP結晶を使用した3倍高調波(3ω)変換にも、幾つかの方式が存在している。まず、位相整合の取り方により、基本波(ω)と2倍高調波(2ω)をKDP結晶の常光線軸(o 軸)の方向に偏光して入射するタイプIと、 ω を o 軸方向に入射し、 2ω を異常光線軸(e 軸)方向に入射するタイプII方式である⁵⁾。タイプIIの方がタイプIより角度調整精度が緩く、切り出す結晶も小さくてすむことから、激光XII号ではタイプIIが使用された。また、 3ω の発生には 2ω 発生用と 3ω 発生用の2枚の結晶が必要であり、その相互関係より(a) Angle-Detuning, (b) Polarization-Mismatch, (c) Polarization-Bypassの3つの方法がある⁵⁾。激光XII号では結晶の間に波長板を必要とせず、タイプIIの結晶が使用できる(b)の方式が採用された。

3.3 大型KDP結晶

KDPは水溶性の正方晶の結晶であるため、他

Fig.1 KDP crystals under cutting, shaping and polishing.

Fig. 2 Schematics of the KDP cell for the Gekko XII glass laser.

の溶融法により育成される結晶と比べて、比較的容易に大型結晶を育成できる。最初に良質の種結晶を育成し、KDPを溶解した水溶液中で温度降下法により、大型結晶に育成する。激光XII号で使用されたKDP結晶は、当センターの長年の努力の結果開発された均一性・レーザーダメージ耐力に優れたものであったが、激光XII号の 3ω 化が予算化された時期(1986年)には、単一結晶で有効径38cmを得ることができず、4分割の8枚の結晶をセルの中で組み合わせる方式が採用された。この選択は同時に今後のより大口径(60cm以上)の結晶セルを製作する場合に備えて、組み合わせ結晶の基礎技術を開発するためでもあった。このため、大型結晶から結晶板を切り出し、レーザー装置により基準結晶との比較で光軸測定を行う方法が開発された⁶⁾。各分割結晶の角度許容誤差は 2ω 用 $\pm 60 \mu\text{rad}$ 以内、 3ω 用 $\pm 30 \mu\text{rad}$ 以内で、角度修正と表面研磨は特別に開発されたダイヤモンドターニングマシンを使用して行われた。結晶の表面粗さは $0.02 \mu\text{m}$ 以内に仕上げられた。結晶のブールおよび切り出し、整形、研磨中の結晶板の写真をFig. 1に示す。

3.4 大型KDPセルの構造

前節で述べたように、激光XII号の波長変換には $2\omega \cdot 3\omega$ 発生用の各々4枚ずつの結晶板を使用しなければならないために、合計8枚の四分円形の結晶を保持するセルが必要である。各々の結晶板の保持精度は、波長変換の効率に影響を与えない $\pm 30 \mu\text{rad}$ 以内になっている必要があり、 $100 \mu\text{m}$ の厚みのステンレス板のスペーサーにより結晶と窓ガラス、および結晶相互の間の屈折率整合液の厚みを保つ構造が採用された。結晶の厚みは 2ω 用、 3ω 用共に12mm、セルの有効径は36cm以上、波面歪みは非球面成分で $\lambda/4$ 以下を目標としたため、入射側窓(材質BK-7)および出射側窓(溶融石英)の厚みは35mmとした。セル構造をFig. 2に示す。この構造のため窓は結晶保持と波面の維持を同時に行わなければならない、後述するような特殊な波面調整の手法を開発する必要が生じた。屈折率整合液は、誘導ラマン散乱の発生閾値の高い炭酸プロピレンを使用した、このために液のシールに用いたOリングは、特殊なシリコンゴム製を使用しなければならなかった。組み立てではセルの寸法、各結晶の厚みとOリングの直径を測定し、窓の締め込み量を算出した。ま

Fig.3 KDPcell for third harmonic generation.

Fig.4 Target chamber with a 3ω irradiation system. Half of 12 beams (6 beams) are seen in the photograph.

た、結晶表面が粗かったため、屈折率整合液を後から注入するとどうしても気泡が残ったため、液中で結晶を組み上げる方法を採用した。4分割結晶の間には誘導ラマン散乱を防止するための遮光帯をセルの厚みいっぱい挿入し、セルの入射と出射窓の外側には、結晶分割部に光が当たらないようにするため、レーザー光を吸収する十字形の遮光板を設けた。このKDPセルはターゲットチェンバーに取り付けられたレンズ駆動装置の外側に、KDP駆動装置により取り付けられた。このKDP駆動装置の角度分解能は $0.3\mu\text{rad}$ であった。組み立てを完了したセルの写真をFig.3、ターゲットチェンバーに取り付けられたKDP駆動装置と結晶セルおよび感光

紙に記録された 3ω 光パターンをFig.4に示す。

3.5 エネルギーモニター系

核融合実験では、ターゲットに照射するレーザービームの強度を正確に調整し、照射の均一性を得ることが重要であるが、このビームバランスは高調波光で取られなければならない。しかし、多数本の大口径のレーザービームのエネルギーおよび波形を正確に測定するのは、一般的な予想以上に困難な仕事である。特に、レーザー光の分布に変化を与えずに計測を行うためには、特別の配慮が必要である。激光XII号では高調波光のエネルギーと波形は、KDP結晶セルの出力側窓の表面反射を利用し、最終の折り曲げミラーを透過する光を用いて計測されている。Fig.5に測定系の配置図を示す。しかしこの計測法では、窓の反射率やミラーの透過率が空気中の湿度で変化したり、低いエネルギーの調整ショットでは基本波の強度が高調波に比べて非常に強く、反射防止コーティングの反射率も基本波の方が高いため、反射された基本波が結晶内を通過する時に高調波に変換されて測定誤差を生じる。これらの問題を解決するため、セルの出力側の窓はコートを行わずに高調波光の反射率を上げ、ミラーのコーティングも高調波の波長を中心に広い波長範囲で一定の透過率を保つものを採用した。またこの計測法では、エネルギーモニター系はKDPセルからの反射光のみならず、ターゲットからの反射光も受けてしまうため、信号を時間分解計測する必要が生じる。このような多数の信号の時間分解計測を精度良く行うため、時間ゲートを有する積分型のA/D変換器(CAMACシステム)が使用された。しかし、このA/D変換器は信号電圧が $1\sim 2\text{V}$ になると誤動作する特性が有るため、電圧を落として計測する必要があり、測定精度が十分に取れなかった($1\sim 2\%$)。測定精度を向上するため、この測定系に外部高速ゲート回路を付加して使用している。また、エネルギーモニターの絶対較正は、基本波で40J程度の100psパルスを結晶に入射し、発生する高調波光のエネルギーを、

Fig.5 Schematic diagram of the energy monitoring system.

誘電体多層膜をコートした波長選別板を使用して測定して行っている。現在もA/D変換器のカウント数を200程度から1000に増加するため、外部積分回路の導入等のテストが行われている。

3.6 変換効率

先に述べた非線形相互作用方程式からは、最適の入射強度では80%を越える 3ω への変換効率が得られるはずであるが、激光XII号に12個の結晶を取り付けて最初に変換効率を測定すると、30~40%の効率しか得られなかった。この原因を調査したところ、結晶の透過波面を良くするために、セルの窓板の圧迫を緩くしており、取り付け作業で結晶セルを動かしたために、窓を保持するOリングが窓の自重のために変形し、結晶を保持する窓間隔が変化してしまったものと判明した。このため急遽結晶セルを取り外し、透過波面より結晶の角度保持を優先して窓間隔を調整した結果、12ビームの平均で $60 \pm 10\%$ の変換効率を得た。入射強度に対する実測変換効率をFig. 6に示す。変換効率が予測通りに得られていない理由についてレーザー部の光学素子にかかる応力によるビームの偏光の劣化と、ビームパス中の窒素分子の回転ラマン散乱による偏光面回転について測定したが、明白な偏光の劣化や回転は観測されなかった。このほか実際の高出力ショットでは実験を始めてすぐ

Fig.6 Conversion efficiency measured and calculated for 3ω .

に、結晶セル内に多数の気泡が発生し、集光レンズに回折による損傷を生じ始めた。そのままショットを続けると損傷が進行し、集光レンズが真空応力で割れるため、ショットを中止して原因調査を行った。その結果、気泡は液中で結晶セルを組み立てる際に混入した、僅かなダストが原因であることが判明したため、全てのセルを再度分解・洗浄し、組み立て完了後に清浄な整合液を循環して、ダストを除去した。その結果、最終組み立てより3年以上を経過した現在でも殆どのセルに気泡は発生していない。また透過波面についてもセルの窓を圧迫する窓抑

(a) Before improvement.

(b) After improvement.

Fig.7 Improvement of the wavefront distortion in a segmented cell. (a) Before improvement; (b) After improvement.

Fig.8 Large scale KDP crystal of the monolithic structure in 40 cm diameter.

えとセル本体の間にスペーサーを挿入し、結晶を保持するために生じる窓の変形を外部より補正する方法を採用したところ、球面収差は含むが非球面収差の小さい透過波面が得られた。その調整前と完了後の透過波面をFig. 7に示す。

4. 現在の問題点と今後の方針

以上述べて来たように、激光XII号では有効径360mmの世界最大の分割結晶・屈折率整合液を使用した波長変換セルを使用して、3倍高調波が爆縮実験に定常的に使用されている。しかし現在の技術には、低い変換効率、大きい球面収差、集光パターン上の遮光帯による回折フリンジ等が含まれており、決して満足すべき状態にはない。そこで現在、上記の問題点を解決するために40cm級のモノリシック結晶が切り出せる超大型結晶の開発が進んでおり、自重300kgを越える結晶が量産されつつある。Fig. 8にその結晶の写真を示す。写真の左側の結晶が激光XII号の 3ω 化に使用されたものであり、大型化の様子がわかる。このような大型結晶は取扱、切り出し、軸測定、光学研磨等どれをとっても従来に無い経験であるが、順調に技術開発が進みつつあり、数カ月以内にモノリシックの3倍高調波発生用セルが完成する予定である。

また今後の激光XII号アップグレードに必要なとされる60cm級のドライセルの基礎技術として、結晶の光学研磨と反射防止コートについても技術開発が進んでいる。

謝辞

本報告はレーザー核融合研究センターの多くのグループと関係企業の長年の努力の結果、得られた成果をまとめたものである。当センター・クリスタルグループ、光学技術室、ガラスレーザー運用開発室および100kJレーザー開発委員会参加各社、特にキャノン株式会社、キャノン販売株式会社、御幣島化学株式会社、株式会社オプトケミカルの多大の貢献があったことを申し添え、紙面を借りて御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) L. A. Rosocha, R. G. Anderson, S. J. Czuchlewski, J. A. Hanlon, J. E. Jones, R. G. Jones, *CLEO'89 Technical Digest*, (1989) MG-2.
- 2) J. T. Hunt and D. R. Spec, *Optical Engineering*, 28 (1989) 461.
- 3) M. Nakatsuka, T. Jitsuno, T. Kanabe, S. Urushibara, N. Miyanaga, S. Nakai, *SPIE Proceedings 1411* (1991) 108.
- 4) A. Yariv, “光エレクトロニクスの基礎”, 丸善 1988.
- 5) R. S. Craxton, *Optics Communications* 34 (1980) 474.
- 6) 佐々木孝友, 横谷篤至, 山中龍彦, 山中千代衛: レーザー研究, 13 (1985) 44.