

高繰り返し Nd:YAG レーザー励起近赤外 QPM 結晶を用いた OPA の熱特性

Thermal characteristics of OPA with a near infrared QPM crystal excited by a high-repetition-rate Nd:YAG laser

武本和大、柴田泰邦、長澤親生

Kazuhiro Takemoto, Yasukuni Shibata and Chikao Nagasawa

首都大学東京 システムデザイン研究科

Tokyo Metropolitan University

Abstract:

We have developed the OPA laser system as high power and a wideband tunable laser in near infrared region for the transmitter of LIDAR. In this paper, we theoretically analyze the influence of the temperature rise by pump beam absorption in the QPM-MgSLT crystal on the OPA conversion efficiency when the high repetition-rate Nd:YAG laser was injected to $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 35\text{mm}$ and $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 35\text{mm}$ QPM-MgSLT crystals, and compare them with the measured values.

1. はじめに

ライダーの送信系として、多くの分子吸収線を持ち、アイセーフもクリアすることから、近赤外域での高出力で広帯域の波長可変レーザーの開発が求められている。このような光源を実現する手段の一つとして、固体レーザー・半導体レーザーを励起光源とした光パラメトリック増幅器 (OPA:Optical Parametric Amplifier) がある。特に高いパルスエネルギーと高繰り返しによる高い平均パワーを持つ LD 励起 Nd:YAG レーザーの基本波を、疑似位相整合(QPM)デバイスに入力させることによる OPA は出力、効率、ビーム品質などの点から注目されているが、高い励起エネルギーに対する OPA 発振特性や波長特性に未解明な点が多い。

本研究は、高繰り返し Nd:YAG レーザーを $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 35\text{mm}$ と $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 35\text{mm}$ の2種類の QPM-Mg:SLT 結晶に入力したとき、レーザー光吸収によって起こる結晶内の温度上昇が OPA 変換効率に影響することを理論的に解析し、実測値との比較を行った。

2. 結晶内部の温度シミュレーション

QPM 結晶の温度は、発振波長を制御するために結晶の上部と下部を 0.01K の精度で温度制御をしている。しかし、結晶内でレーザーエネルギーの吸収が起きることによって、結晶内部に温度勾配が生じ、波長変換効率に影響を及ぼすことが推測できる。その影響を解析するため、我々は以下の手順で結晶内部の温度分布を求めるシミュレーションを行った。

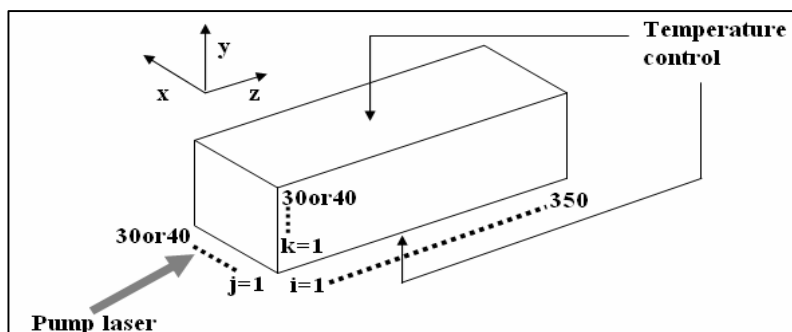


Fig.1 Model crystal of temperature distribution analysis

2. 1 シミュレーションモデル

結晶内部の3次元温度分布をシミュレーションするために、Fig.1に示すようなモデル結晶を考えた。3次元空間を格子幅0.1mmで区切り、幅をx軸、厚みをy軸、結晶長をz軸に沿うものとした。

2. 2 内部発熱量

結晶内部での発熱量を計算するために、レーザーの透過率を測定し結晶内の吸収係数を計算した。

$$a = \frac{\ln(I_{out}/I_{in})}{-L} \quad (1)$$

ここで I_{in} と I_{out} はそれぞれ入射光と透過光の強度を表し、Lは結晶長である。この時、結晶内の吸収係数は一様であると仮定した。

計算した吸収係数から、各メッシュ上でのレーザー強度分布は(2)式のようなになる。

$$I(i, j, k) = I0(j, k) \exp(-a \times z(i)) \quad (2)$$

ここで、 $I(i, j, k)$ はメッシュ(I,j,k)でのレーザー強度を表す。 $I0(j, k)$ は $z=0$ 上でのレーザーの強度分布であり、ビームプロファイラで測定したデータを用いた。これを fig.3 に示す。

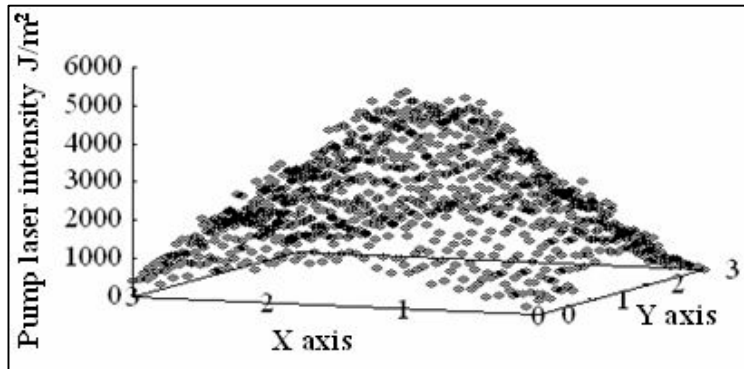


Fig.2
Beam profile of
Nd:YAG laser

各メッシュでのレーザー強度分布から発熱量は(3)式のように計算できる。

$$W(i, j, k) = I(i, j, k) - I(i, j, k + 1) \quad (3)$$

2. 3 温度分布シミュレーション

結晶内部の温度変化は(4)式のような3次元の熱伝導方程式によって与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 ρ と C は結晶の密度と比熱、 k は熱伝導率である。温度の上昇は数Kなので、これらのパラメータの温度依存は無視できると仮定した。

これを計算シミュレーションで解くために、境界条件として温度制御に接した部分は温度変化しない(温度が制御温度に保たれている)とし、その他の表面温度は空気との熱伝達係数が無視できるほど十分低いとして断熱条件を用いた。また、時間差分には explicit 法(陽解法)を適用した。

Table1.と Table.2 にこの計算に使用した Nd:YAG laser の特性と QPM-MgSLT の物理量を示す。

| | |
|-----------------|---------------|
| Pulse energy | 20 mJ / pulse |
| Pulse width | 10 ns |
| Repetition rate | 500 Hz |
| Beam diameter | 3 mm |

| | |
|----------------------|----------------------------|
| Specific heat | 423.9 J / kg K |
| Density | 7460.0 kg / m ³ |
| Thermal conductivity | 8.4 W / m K |

3. 温度分布の解析結果・考察

・3mm×3mm×35mm 結晶について

Fig.3 に、内部温度が定常状態になったときの $z = 0$ における $x - y$ 面の温度分布を示す。

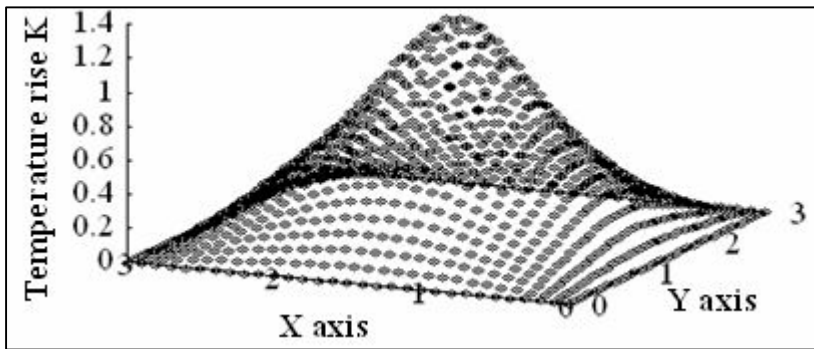


Fig.3
Thermal distribution of
3mm×3mm×35mm crystal

ここで、縦軸は零を制御温度とした上昇温度を表している。

・4mm×4mm×35mm 結晶について

Fig.4 に、内部温度が定常状態になったときの $z = 0$ における $x - y$ 面の温度分布を示す。

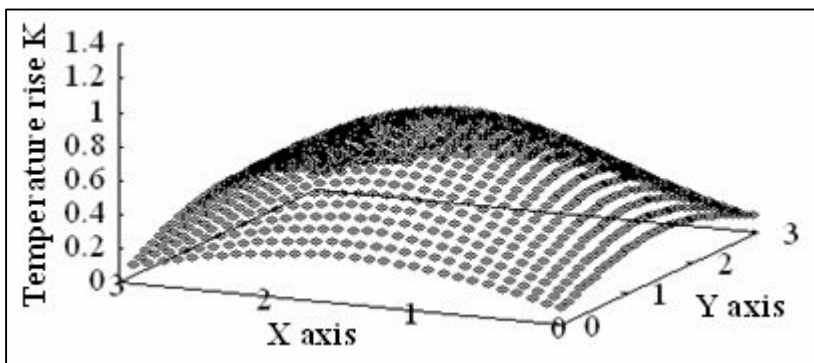


Fig.4
Thermal distribution of
4mm×4mm×35mm crystal

3mm 厚と同じく、縦軸は零を制御温度とした上昇温度を表す。また、レーザーのビーム径が 3mm なので、内側の 3mm×3mm の部分だけグラフ化した。

励起レーザーの強度分布を重み関数として、温度平均をとると、3mm 厚は 0.9K、4mm 厚は 0.56K となった。

4. 温度変化と位相不整合の関係

シミュレーションによって得られた温度分布から利得への影響を求めるために、以下の計算を行った。まず、QPM 結晶を用いた OPA における波数不整合と、シグナル光の小信号利得係数、また、全利得はそれぞれ(5)、(6)、(7)式によって与えられる。1)

$$\Delta k = \frac{2\pi n_p}{\lambda_p} - \frac{2\pi n_s}{\lambda_s} - \frac{2\pi n_i}{\lambda_i} - \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (5) \quad g_{eff} = \sqrt{\frac{8\pi^2 d_{eff}}{\lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p \epsilon_0 c} I_p - \frac{\Delta k^2}{4}} \quad (6)$$

$$G = \cosh^2(g_{eff} L) \quad (7)$$

ここで、 n_p, n_s, n_i と $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ はそれぞれ励起光・シグナル光・アイドラー光の屈折率、波長を表し、 d_{eff} は非線形光学定数の実効値、 ϵ_0 と c はそれぞれ真空中の誘電率と光速、 Λ は QPM 結晶の分極反転周期を表す。また、 I_p は単位時間・単位面積辺りの励起光の強度を表す。

結晶中の温度が変化すると、分極反転周期が変化し、また屈折率も変化する²⁾。(6)式から得られた小信号利得係数の温度依存性を Fig.5 に示す。

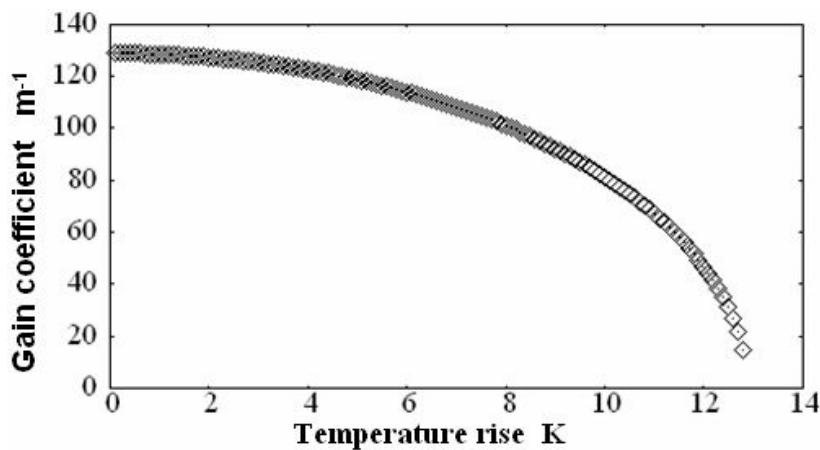


Fig.5
Temperature dependence of small-signal gain coefficient

温度分布の平均と、各メッシュでの温度勾配（共に励起レーザーの強度分布を重み関数として考慮する）、そして Fig.5 の計算結果から、位相不整合の影響を含めた小信号利得係数が計算できる。

5. 利得の解析結果・実験値との比較

3mm 厚と 4mm 厚の OPA 出力の相対比率は全利得の相対比率と一致する。全利得の相対比率の理論値を、同条件下での測定結果の OPA 出力の相対比率と比較したので、結果を Table.3 に示す。

| | $I_s(3mm) / I_s(4mm)$ |
|--------------------|-----------------------|
| Theoretical value | 0.984 |
| Experimental value | 0.895 |

Table.3
Theoretical and experimental relative ratio of output energy between 3mm×3mm and 4mm×4mm crystal.

6. まとめ

上記の条件下において 4mm×4mm MgSLT は 3mm×3mm MgSLT よりも温度分布に起因する位相不整合が小さくなり、変換効率は高くなることが分かった。この傾向は、実験値とも一致するが、この他の要因も影響していることが考えられる。位相不整合の原因は結晶内の温度勾配の他に、分極反転比率（Duty 比）の違いが考えられる。分極反転比率の精度は 4mm 厚結晶の方が良いものを使用しているため、今後その影響を検討する。

参考文献

- 1)黒田和男(2008)『非線形光学』コロナ社
- 2) Ariel Bruner, David Eg,er, Moshe B. Oron, Pinhas Blau, and Moti Katz, "Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate, " Opt.Lett., Vol. 28, No. 3, pp. 194-196 (2003).