

Z-scan 法によるレーザーセラミックスの非線形屈折率の測定

電子工学科 植田研究室 萩原 旬

第1章 序論

現在、単結晶は固体レーザー媒質として最も広く用いられている材料のひとつであり応用範囲も広い。これまで実際に Nd:YAG、Nd:Y₂O₃、Yb:Y₂O₃、およびいくつかのセラミックスにおいて、効果的なレーザー発振が示されている。

高い熱伝導率を持った単結晶と同等の性質を持ちながら、容易に作成が可能なセラミックスは、多結晶と言われるように、単結晶よりも光学均一性が優れている可能性がある。均一性によって同じサイズの素子や同じ励起条件で、セラミックスからより高いエネルギーでレーザー発振することができる。レーザーセラミックスの可能な応用としては、核融合用レーザーや高出力パルスレーザーのための活性媒体としての使用法である。

非線形の屈折率 n_2 は自己収束による光学媒体の破壊閾値と関係があり、ハイパワー固体レーザーと関連する光学系を設計する上で重要な検討事項である。この論文では数個の新しいレーザーセラミックスの非線形屈折率測定の実験を扱う。

第2章 非線形屈折率とその測定方法

2-1 非線形屈折率の測定の原理

光学媒体の非線形屈折率 n_2 は光波の強電場 \mathbf{E} によって変化し以下のような式となる

$$n = n_0 + \frac{n_2}{2} |\mathbf{E}|^2 = n_0 + \mathcal{M} \quad \text{式 2-1}$$

ただし n_0 は線形屈折率、 \mathbf{E} は光波の電場、 I は光強度、 \mathcal{M} は非線形カー係数である。式 2-1 にある 2 次項を非線形屈折率、非線形カー係数などによぶこともある。この現象は電場が強いときに、屈折率が変化する現象光カー効果によるものである。以後 n_2 として取扱う。

その代表的な効果として、自己集束、自己発散などがありそれについて説明を加える。

非線形光学媒体に強度分布を持った光が入射すると、屈折率は光強度に依存しているので、非線形屈折率 n_2 が $n_2 < 0$ であれば光強度の高い部分の位相速度がおくれ、ビームは中心部へと集束していく。また逆に非線形屈折率 n_2 が $n_2 > 0$ であれば、ビームの位相速度は進みビームは広がっていき発散する。

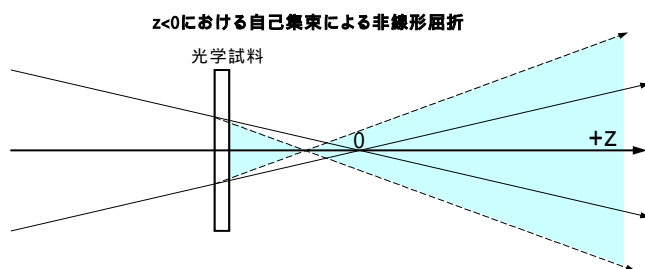


図 2-1

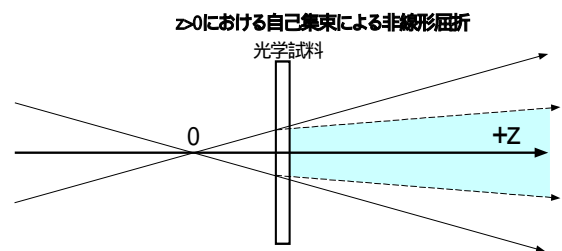


図 2-2

2-1 Z-scan 法による測定

Z-scan 法による実験器具は図 2-3 に示す。10Hz の Q スイッチ Nd:YAG レーザーを用い、 $\lambda/2$ 板や polarizers を通して、可変減衰機として機能し、強度を減衰させている。さらに凹レンズと凸レンズを用いたテレスコープによりビーム径を 3 倍に広げ、径の大きさ $d=2.05[\text{mm}]$ のピンホール A1 を通してトップハットビームとしている。ミラーをおいて反射させた光をフォトダイオード PD2 に入れて参照光とし、 $f=150[\text{mm}]$ の凸レンズに入れ集光させている。このレンズの焦点あたりに光軸と同じ方向を z 方向とし、図にもあるようにレンズから遠ざかる方向を正のむきとして軸をとる。およそ $z=0$ 付近に試料を置いた。試料のさらに遠方にピンホール A2 をおき、このピンホールを通過した光の強度をフォトダイオード PD1 を用いて測定する。

測定の間、 z に従って付随する強度が変化すると想定されるので、慎重にパルスエネルギーレベルをモニターすることが必須である。PD1 と PD2 をエネルギーメーターとして利用し測定する際、レーザー自体の出力が変動しやすく、データのばらつきを押さえるために 64 個のパルスエネルギーの平均をとった。

この測定により得られる測定値を正規化し、グラフで表したものを図 2-4 に示す。

Z-scan 法による測定の実験図

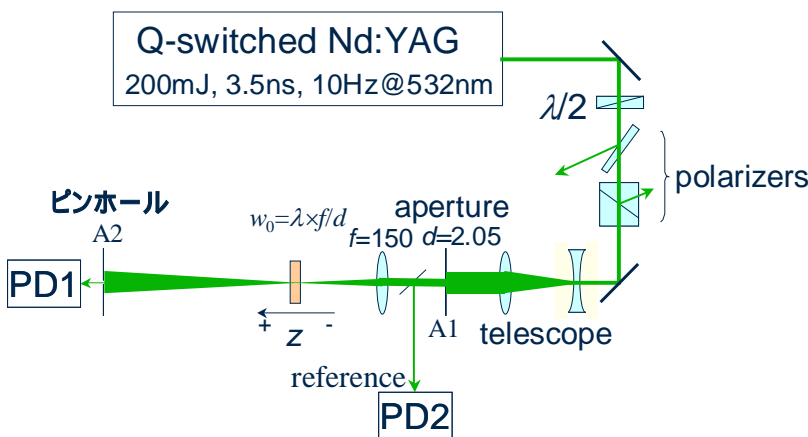


図 2-3

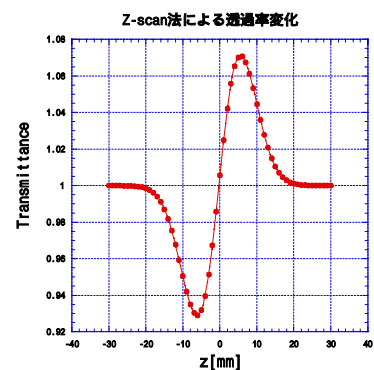


図 2-4

2-3 非線形屈折率を求める

波長 λ 、A1 のピンホールの直径 $d=2.05[\text{mm}]$ 、凸レンズの焦点距離 $f=150[\text{mm}]$ する。レンズ F 値を $F=f/d$ とし、トップハットビームのウエストを $w_0 = F \lambda$ と決める。そのときのレイリー長は $z_0 = w_0^2 / \lambda$ となる。非線形の波長変調 $\Delta\lambda$ は、焦点における軸上の強度 I を用いて、

$$\Phi = kLn_2I \quad \text{式 2-2}$$

となる。いま、強度 I は直接的に測定することができないので、試料に入射するパルスエネルギーから強度 I の時間平均を用いて計算をすると

$$\Phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 L \overline{I(t)}$$

$$\Leftrightarrow n_2 = \frac{\lambda}{2\pi L} \frac{1}{\overline{I(t)}} \Phi_0$$
式 2-3

となり、これより強度 I の時間平均と位相変調がわかれば n_2 が求まることがわかる。

まずは位相変調を求める。観測される透過率を正規化し、グラフにプロットする。そのピークとバレイの差 T_{pv} をグラフから求める。その値より Φ_0 は以下ようになる。

$$\Phi_0 = 2.7 \tanh^{-1} \left(\frac{T_{pv}}{2.8(1-S)^{1.14}} \right)$$
式 2-4

次に、時間平均の項を求める。ここで強度を時間平均したものから、軸上におけるピーク光強度 I_0 を求めるのに

$$\overline{I(t)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} I(t)^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} I(t) dt} = I_0 \frac{1}{f_c}$$
式 2-5

という関係式を用いる。いま、実測波形から $f_c = 1.52$ と求まる。また、軸上のピーク光強度 I_0 を直接的に求めることができないので、

$$I_0 = \frac{\pi n_0}{2w_0^2} P_0$$
式 2-6

の関係式をもちいて、 P_0 からピーク光強度 I_0 を求める。入射するパルスエネルギーはレーザーの時間波形を $P(t)$ とすると

$$\varepsilon = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt = c P_0 \tau$$

$$\Leftrightarrow P_0 = \frac{1}{c} \frac{\varepsilon}{\tau}$$
式 2-7

と計算でき、 P_0 はピークパワーを表わし、半値全幅(FWHM)の時間 τ は実測波形から求める。今回利用したパルスレーザーは $c=1.1$ と計算できた。

以上求めた値を式 2-3 に代入すると、

$$n_2 = c f_c \frac{\lambda w_0^2 \tau}{\pi^2 n_0 \varepsilon L} \Phi_0$$
式 2-8

となり、この式より非線形屈折率 n_2 を求める。

第3章 実験結果と結論

測定に用いた光学試料は Fused silica、YAG 単結晶、YAG セラミックス、 Y_2O_3 、 Lu_2O_3 、 Sc_2O_3 である。まずは Fused silica と YAG セラミックスでは以下のような実験結果となった。実験結果の測定波形を図 3-1、3-2 に記す。このデータのピークとバレイより透過率 T_{pv} より n_2 を計算により求めた。すべてのデータをまとめたものを表 3-1 に示す。

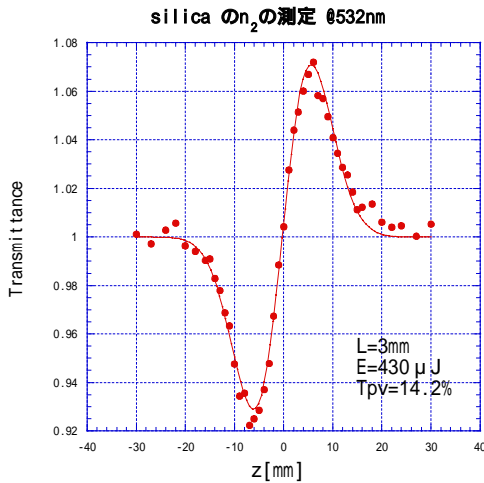


図 3-1

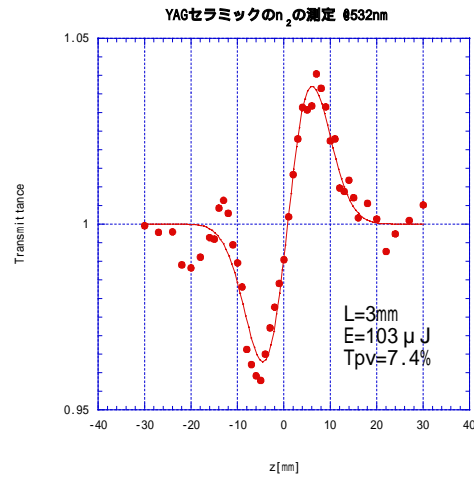


図 3-2

表 3-1 測定した非線形屈折率 n_2

sample	n_0 (@532nm)	n_2 ($10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$)	n_2 (literatures) ($10^{-16} \text{cm}^2/\text{W}$)
Fused silica	1.461	2.0 ± 0.4	2.45(a) 2.1(b)
YAG crystal	1.83	6.6 ± 1.3	6.2(a) 6.9(b)
YAG セラミックス	1.83	6.2 ± 1.2	-
Y_2O_3 セラミックス	1.92	13 ± 2.6	cf. crystal 11.6(a)
Lu_2O_3	1.93	11.6 ± 2.4	-
Sc_2O_3	2.01	11.6 ± 2.4	-

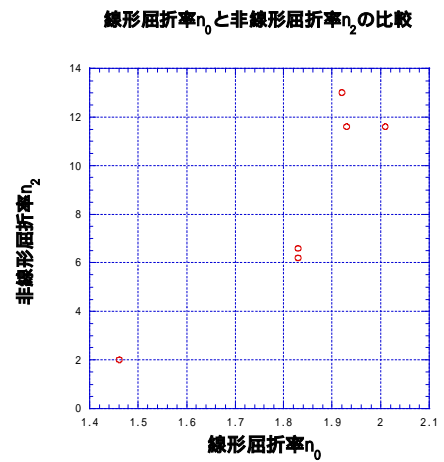


図 3-3

今回の実験で求めた非線形屈折率 n_2 は、他の論文で示されているシリカの n_2 について比較すれば、信頼性のある結果が得られたといえる。これにより、他の光学試料に関しても、精度ある実験値だといえる。また、YAG セラミックスについては、YAG 単結晶とほぼ同じ値となり、セラミックスと単結晶とでそれほどの変化はみられなかった。