

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17534

研究課題名(和文) 光学的波長変換によるSi系カメラを用いた高解像THzリアルタイムイメージング開発

研究課題名(英文) High-resolution, THz-wave real-time imaging with Si-camera based on nonlinear optical up-conversion.

研究代表者

小山 美緒 (Koyama, Mio)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・特別研究員

研究者番号：90757147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ波発生用の光学結晶である有機結晶DASTの、簡便な結晶品質の可視化および非線形係数の計測を行った。この装置はDAST結晶の1)結晶品質の面内分布を可視化し、優れた結晶個体を迅速に選り出す。2)基本波の偏光を変えることで、結晶の向きによって異なる非線形係数を計測し、それらの比を高精度に算出する。3)非線形係数の値を相対的に評価することが可能になった。加えて、結晶育成研究における結晶評価時のサンプル加工の負担を軽減することができる。

研究成果の概要(英文)：A system for measuring the in-plane crystal quality and nonlinear coefficient of a nonlinear organic crystal 4 - dimethylamino - N' - methyl - 4' - stilbazolium tosylate (DAST) used for THz wave generation was established. The system achieved to 1) show the in-plane crystal quality of the DAST and find the crystal with high quality. 2) measure the ratio of nonlinear coefficients which are different value depending on crystal orientation. 3) obtain nonlinear coefficient value based on comparative method. The system reduces a preparing cost for evaluation of a crystal in the study of crystal growth.

研究分野：レーザー光学

キーワード：有機結晶 非線形光学係数 結晶評価

1. 研究開始当初の背景

分子の指紋スペクトル帯にあたるテラヘルツ波は、可視光が透過しないプラスチック、シリコン、木材、紙といった物質を透過するという特徴から、テラヘルツ波イメージングによる非破壊・非接触検査への応用が注目されている。既に空港でのボディスキャナーや、食品検査装置といった応用がある。近年では技術の高精細化によって、マイクロ～ナノメートルオーダーの解像度が求められているが、リアルタイムイメージングにおいて解像度はミリメートルレベルにとどまっており、テラヘルツ波の波長以下の解像度はいまだ得られていない。

本研究では、これらの条件を満たす有機非線形結晶 4-dimethylamino-N'-methyl-4'-stilbazolium tosylate (DAST)を用いた差周波発生 (DFG: Defference frequency generation) および第二高調波発生 (SHG: Second harmonic generation) によって、テラヘルツ波を二段階に波長変換し、数 μm レベルの高解像度テラヘルツ波イメージングシステムの開発を目標とする。テラヘルツ波を近赤外からさらに可視領域光にまで変換することにより、高感度な焦点面アレイ (FPA: focal plane array) シリコン系カメラを使用でき、室温環境での容易なリアルタイムイメージングが可能となる。

しかし前述の高解像度テラヘルツイメージングに要する、THz から可視光への高い変換効率を達成するためには、有機非線形結晶が広範囲に高品質である必要がある。テラヘルツ波の波長変換効率は 10 の-6 乗と小さいが、結晶に入射するビームサイズを大きくし波長変換の領域を拡大することで、可視域カメラで観測可能な出力が得られると考えられる。対して有機結晶・新規材料は安定した結晶性を得ることが難しいため、結晶品質の簡便な確認手法と、波長変換の出力を決定する非線形係数の計測が重要になる。そこで、当研究室で育成している DAST 結晶を簡便かつ迅速に面内品質を計測し、さらに非線形係数を評価する装置の開発を行う。これによりアップコンバージョンを行う際に利用可能な DAST 結晶の判別が可能になり、また結晶計測の簡便化によって有機結晶育成の研究を促進すると期待される。

2. 研究の目的

高解像度テラヘルツイメージングに用いる有機非線形結晶 DAST 内での高効率な波長変換を行うため、1)優れた結晶性を持つ DAST 結晶を判別すること、2)非線形係数の相対評価による結晶品質を定量的に計測することを目的とした。また、一般的に有機結晶は機械的強度が低く、通常結晶評価の際に必要な高精度のサンプル加工に大きな負担がかかる。多量のサンプルの中から優れた結晶を迅速に選び出すため、サンプル加工の負担が少なく、また計測手順が簡便な装置を

開発する。

3. 研究の方法

結晶の非線形係数を計測する手法として特に知られているのは、非位相整合状態の第二高調波発生を利用したメーカープリング法[1]である。この手法では、平行平板のサンプルの回転により結晶厚みを変化させ、第二高調波の出力が振動しながら変化する様子を計測し、その振幅値から非線形係数を評価する。精度良く計測するためには、サンプルの表面と裏面の平行度を高くするため、サンプルの準備に時間を要し、迅速な計測が難しい。

本研究では、簡便に非線形光学結晶の結晶性を明確化し、同時に非線形係数を相対評価する装置を実現するため、計測手法としてウェッジ法を採用した。これは微小勾配のある結晶を平行移動させて厚みを変化させ、第二高調波の出力変化を計測する手法である。この微小勾配の角度には結晶ごとに許容があるため、高精度なサンプル加工を必要としない。さらにサンプルは計測ステージに設置するだけでよく、二次元に結晶面内の品質を計測することも容易である。

4. 研究成果

1) 計測手法の検討

まずウェッジ法の計測手法に関して検討する。一般的に教科書でよく知られた第二高調波の出力 $P_{2\omega}$ は、次のように表される[2]。

$$P_{2\omega}(L) = 2 \left(\frac{\mu}{\epsilon_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\omega^2 d^2 L^2 P_{\omega}^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)}{n_{\omega}^2 n_{2\omega} A \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)^2} \quad (1)$$

ω は基本波の角周波数、 P_{ω} は基本波の出力、 A はビーム面積、 Δk は位相不整合量、 d は非線形係数、 n_{ω} 、 $n_{2\omega}$ は基本波および第二高調波に対する屈折率である。位相整合状態では正弦関数の二乗の項は 1 となり、入力光に対して指数的な増加を表す式になる。一方 Δk が大きい非位相整合状態では、式(1)は次のようにまとめられる。

$$P_{2\omega}(L) = K \frac{d^2}{n_{\omega}^2 n_{2\omega} (n_{2\omega} - n_{\omega})^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) \quad (2)$$

$$K = 2 \left(\frac{\mu}{\epsilon_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{c^2 P_{\omega}^2}{A} \quad (3)$$

この式が示すように、第二高調波の出力は入力光を大きくしても位相整合状態のような増加を示さず、サンプルの厚み変化に対して正弦関数の二乗で振動する。この振幅値が非線形係数の情報を含んでいる。

振幅値の計測には、結晶面上に現れる正弦関数の二乗のピークが、最低でも 1 回現れる必要がある。振動のピーク間隔 Λ は、Fig.1 で示すように $\Delta n = n_{2\omega} - n_{\omega}$ とサンプルのウェッジ角で定まる。例えば d_{31}^{LN} ($\Delta n \sim 0.0396$) の場

合は、結晶面に現れるピーク間隔 Λ の下限を 500 μm (サンプリング数がより多ければより短い Λ でもよい)、さらに上限を 5 mm とすると、結晶長 10 mm に対してウェッジ角が約 0.24 ~ 2.4 度の範囲にあれば計測が可能であり、結果としてサンプルに必要なウェッジ角に対する許容は大きくなる。更に式(2)を見ると、サンプルの厚み L が振幅値に影響しないことから、厚みにばらつきのあるサンプルでも互いに定量的な非線形係数の評価が可能だといえる。よって、本手法ではサンプル加工に高い精度が必要でないことが分かる。特に本研究の対象物である有機非線形結晶は、as grown の状態で緩やかな厚み勾配を持つ場合や、個々の厚みが異なる場合が多い。こういった場合でも、サンプルを加工することなく迅速な計測を行うことができる。

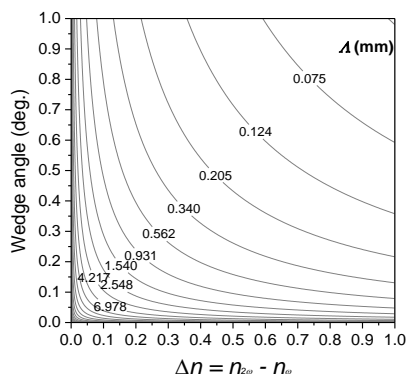


Fig. 1 Λ (mm) according to $\Delta n = n_{2\omega} - n_{\omega}$ and wedge angle (deg.) of a sample.

2) 結晶計測装置の概要

Fig. 2 に装置概要図を示す[3]。本計測では非線形現象である波長変換を位相不整合状態で行うため、発生する第二高調波出力は非常に小さい。そのため、受光器には微小光計測用の光電子増倍管を用いた。同時に計測部分(カメラ、XY ステージ、光電子増倍管)全体をハウジングし、環境光によるノイズを防ぎ微小信号の計測を可能にした。また、光源を高いピークパワーを持つパルス光とし、第二高調波の出力振動の振幅を大きくすることで計測を容易にした。

光源であるレーザーモジュールは DFB LD (FU-68PDF) を利得スイッチ方式でパルス化した種光を、偏波保持 Er 添加シングルモードファイバーで増幅した。パルス幅~25 ps、繰り返し周波数 3.3 MHz、波長 1555 nm、平均出力~5.3 mW (一時間連続動作に対して±1%の安定性)、ピークパワー~130 W、偏光比 24 dB である。更にロックインアンプの同期検出のために 1 kHz で変調している。基本波は光学系を經由し、ビーム直径~20 μm でサンプルを設置する XY ステージ上に集光される。ステージ中央はガラス窓に偏光子(厚み 0.2 mm)が挿入され、第二高調波(777 nm)の直行成分を 99% カットする。偏光制御は結晶および偏光子の置き方で調整する。サンプルから発生した第二高調波は計測ステージ下部

の光電子増倍管 (PMT : Hamamatsu, R928) によって検出され、更に信号はロックインアンプで増幅を受けてから計測される。制御 PC は XY ステージのサンプリング距離、サンプリングスピード、計測範囲を制御し、計測点における PMT の電圧値を記録する。カメラは、計測ステージ上部からのサンプル可視光画像をモニターに表示し、計測範囲の指定ができる。

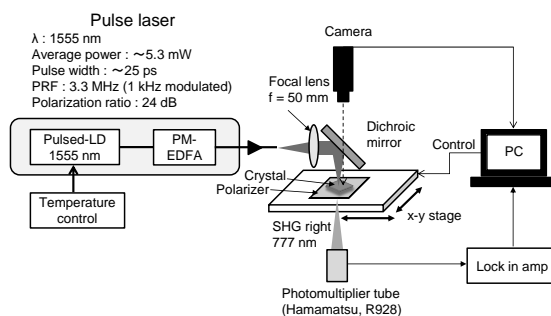


Fig. 2 Experimental setup of nonlinear coefficient measurement system.

本報告では、初めに十分開発され品質が安定している MgO5mol%LiNbO₃(LN) 結晶の d_{31}^{LN} および d_{33}^{LN} を計測することで、計測手法、装置性能、非線形係数の導出精度を確認する。次に、テラヘルツ波発生や電気光学検出において性能指数が高い有機非線形結晶 DAST[4]の as grown 結晶の計測を行う。As grown の DAST 結晶は(100)面の面積が大きく、偏光を選ぶことで d_{11} および d_{12} の計測が可能である。第二高調波出力の分布から面内結晶品質を判別した後、この二つのテンソル成分の比を計測し、更に d_{31}^{LN} を参照とした非線形係数の相対評価を行う。

3) LN 結晶の計測

初めに、非線形係数相対評価の基準値として用いる d_{31}^{LN} の値を定める。1555nm における非線形係数の値はこれまでに計測例がないため、いくつかの波長で得られている報告値から所望の波長での値をミラーのデルタ則[5]を用いて推量した。ミラーのデルタ則は、

$$\Delta = \frac{d_{ijk}(-\omega_3, \omega_2, \omega_1)}{(n_i^2(\omega_3) - 1)(n_j^2(\omega_2) - 1)(n_k^2(\omega_1) - 1)} \quad (4)$$

で表される。 d_{31}^{LN} の非線形係数の波長分散、デルタの値、そこから算出した 1555 nm の非線形係数の値を表 1 にまとめた[6-8]。本評価では、ミラーのデルタから算出された値の平均である $d_{31}^{\text{LN}} = 3.8 \text{ pm/V}$ を基準値として扱うこととする。

計測した LN 結晶を Fig.3 に示す。y-cut 結晶で、サイズが 10×11.6×0.5 mm である。結晶面内で第二高調波の出力が複数回振動し振幅値が十分計測できるように、ウェッジ角度は z 軸方向に 0.29 度とした。 d_{31}^{LN} に対する第二高調波を計測するため、基本波の偏光方向を x 軸方向、偏光子の透過方向を z 軸方向

に合わせている。 d_{33}^{LN} を計測する場合は、基本波の偏光方向をz軸方向に合わせる。

サンプル面上における第二高調波の出力分布を Fig.4 (a-1)および(b-1)に示す。(a)が d_{31}^{LN} 、(b)が d_{33}^{LN} の結果である。第二高調波の出力は厚み勾配のあるz方向に対して振動する。各地点の振幅強度に大きな変動が見られないことから、LN結晶が高い面内結晶均一性を持つことが分かる。Fig.4 (a-2)および(b-2)は、Fig.4 (a-1)および(b-1)の白い破線に沿った強度断面図である。LN結晶のように十分に開発が進んでいる結晶の場合、このように振動の波高である振幅値が揃った振動が見られる。結果、 d_{31}^{LN} に対する最大振幅値は0.31 mVであり、同様に d_{33}^{LN} の最大振幅値は9.9 mVと計測された。

振幅値から非線形係数の比を算出するには、(3)式から導出した以下の式を用いる。

$$\frac{d}{d_{Ref.}} = \sqrt{\frac{V}{V_{Ref.}} \times \frac{n'}{n'_{Ref.}}} \quad (5)$$

$$n' = n_{\omega}^2 n_{2\omega} (n_{2\omega} - n_{\omega})^2 \quad (6)$$

ここでdは非線形係数、Vは第二高調波出力の振幅値、n'は(6)式で表される屈折率の項を表す。添字のRef.は基準であり、本論文では d_{31}^{LN} の値を表す。計測結果と式(5)から非線形係数の比が得られ、 $d_{33}^{LN} / d_{31}^{LN} = 5.5$ となった。さらに基準値が $d_{31}^{LN} = 3.8 \text{ pm/V}$ であることから、 $d_{33}^{LN} = 20.8 \text{ pm/V}$ となる。

また、装置の非線形係数計測精度を確認するため同サンプルを6回計測した結果、 $d_{33}^{LN} = 20.8 \pm 0.04 \text{ pm/V}$ となり、 $\pm 0.2\%$ の精度が得られた。

Table 1 Reported values of nonlinear coefficient of d_{31}^{LN} and values of d_{31}^{LN} at 1555 nm estimated by Miller's delta.

Researchers	λ (nm)	d_{31} (pm/V)	Delta ($\times 10^{-14}$)	d_{31} @1555nm (pm/V)
I. Shoji	1313	3.4	5.3	3.0
I. Shoji	1064	4.4	7.1	3.9
I. Shoji	852	4.9	7.1	3.9
R. C. Eckardt	1064	4.7	7.6	4.2
Shu-Qi Chen	1064	4.5	7.2	4.0

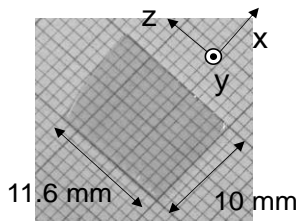


Fig. 3 LN MgO5mol%-dope crystal.

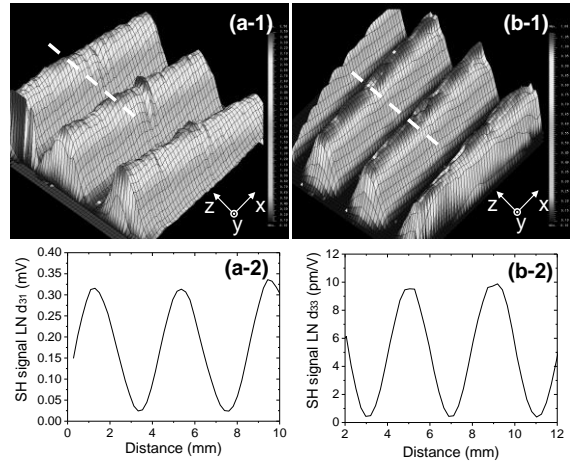


Fig. 4 (a) using d_{31}^{LN} (b) using d_{33}^{LN} . (1) Second harmonic power mapping of LN crystal surface. (2) Cross-sectional view along white break line.

4) DAST結晶の非線形係数

次に DAST 結晶の面内結晶性の計測、 d_{11}^{DAST} と d_{12}^{DAST} の比の導出、更に d_{31}^{LN} を基準値とした非線形係数の相対評価を行う。

DAST結晶はこれまでに独自に開発してきたものであり、超広帯域テラヘルツ発生を実現している[9]。実際に本計測で使用した DAST 結晶を Fig. 5 に示す。As grown の未加工状態で、サイズは $9 \times 6 \times 0.6 \text{ mm}$ である。 d_{11}^{DAST} に対する第二高調波を計測するため、基本波の偏光方向をa軸方向、偏光子の透過方向をa軸方向に合わせている。 d_{12}^{DAST} を計測する場合は、基本波の偏光方向をb軸方向に合わせる。

Fig.6に(a) d_{11}^{DAST} 、(b) d_{12}^{DAST} に対する(1)サンプル面上における第二高調波の出力分布、(2)高出力部分の拡大図、(3)破線部分での断面図を示す。結晶は厚み勾配があるa軸方向に第二高調波出力の振動が現れる。このように面内計測を行うことで、Fig.6(a-2)および(b-2)に示すように、特に出力の高い部位を選び結晶内で最大の振幅値を取得することが可能になる。この付近での振幅値を平均すると、その値は d_{11}^{DAST} で41 mV、 d_{12}^{DAST} は0.19 mVとなる。よって互いの非線形係数の比は、式(5)を用いて $d_{11}^{DAST} / d_{12}^{DAST} = 6.0$ が得られた。

さらにLN結晶とDAST結晶の吸収を考慮して非線形係数を導出すると、 $d_{31}^{LN} = 3.8 \text{ pm/V}$ から $d_{11}^{DAST} = 296 \pm 2 \text{ pm/V}$ 、 $d_{12}^{DAST} = 49.3 \pm 0.3 \text{ pm/V}$ が得られた。6回同じ計測を行った結果から、誤差はそれぞれ $\pm 0.7\%$ 、 $\pm 0.6\%$ となった。非線形係数の既報告値はU.Meierら[10]がメーカーフリッジ法で計測した $d_{11}^{DAST} / d_{12}^{DAST} = 7.1$ 、 $d_{11}^{DAST} = 290 \text{ pm/V}$ 、 $d_{12}^{DAST} = 41 \text{ pm/V}$ である。

更に Fig.7 に結晶性が一様でない DAST 結晶を用いた場合の計測結果を示す。(a)がサンプル画像、(b)が d_{11}^{DAST} に対する白線で囲んだ範囲での第二高調波出力分布である。Fig.7(b)の右半分は出力が比較的高く、また出力値の

振動周期と厚み変化量がほぼ一定であることから、 Δn が一定な結晶品質のよい部分であることが分かる。一方左半分の高調波の出力が低い箇所は結晶内部の欠陥部位にあたり、非線形係数を評価する対象にはならない。非線形結晶の品質は可視画像や透過特性だけで判断することは難しい。しかし本計測のように、非線形係数または屈折率の分布を反映した第二高調波出力の面内計測によって、その判別が可能であることが分かる。

以上のように本手法によって、サンプル準備にかかる時間を大幅に短縮し、かつ簡便な手法で結晶品質の優劣を明確化した上で、非線形係数の値を計測することが可能であることが示された。

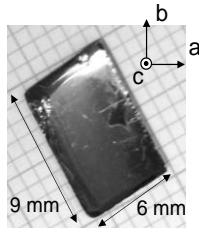


Fig.5 High quality DAST crystal under test.

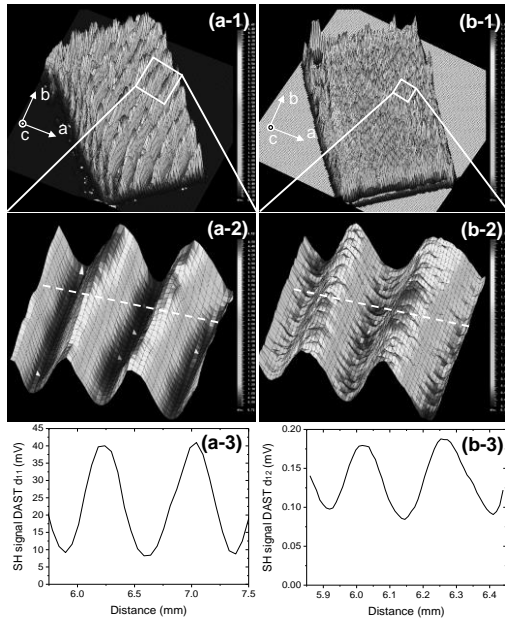


Fig.6 (a) using d_{11} (b) using d_{12} . (1) Second harmonic power mapping of DAST crystal surface. (2) Second harmonic power mapping in white square. (3) Cross-sectional view along white break line.

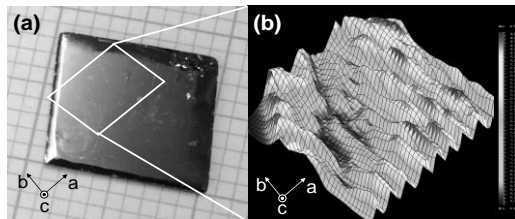


Fig.7 (a) DAST crystal with crystalline defect. (b) Second harmonic power mapping using d_{11} in the area of white square.

5)今後の研究展開—波長掃引による計測—

本報告の結晶計測装置は光源に 1555nm の単色光を用いているが、現在この光源を連続光で出力が安定している波長掃引光源とし、さらなる高精度な計測への研究展開が検討されている。波長掃引による第二高調波の計測の場合、式(2)は次のように書き換えられる。

$$P_{2\omega}(L) = K \frac{d^2}{n_{\omega}^2(\lambda)n_{2\omega}(\lambda)(n_{2\omega}(\lambda) - n_{\omega}(\lambda))^2} \times \sin^2\left(\frac{2\pi L}{\lambda}(n_{2\omega}(\lambda) - n_{\omega}(\lambda))\right) \quad (6)$$

第二高調波の出力は波長の変化に対して正弦関数の二乗で振動する。この時 L は定数であるので、単色光光源の場合に必要なサンプルのウェッジ角は必要なく、例えば緩やかな曲面のサンプルであっても非線形係数の計測が可能になる。

波長掃引によって非線形係数を計測する場合、波長掃引範囲によって計測可能なサンプルの厚み L の下限が定まる。第二高調波の振幅値を計測するためには、掃引開始波長から終了波長までの正弦関数の位相変化量が、最低でも π 以上である必要がある。つまり、

$$\frac{2\pi L}{\lambda_s}(n_{2\omega}(\lambda_s) - n_{\omega}(\lambda_s)) - \frac{2\pi L}{\lambda_e}(n_{2\omega}(\lambda_e) - n_{\omega}(\lambda_e)) > \pi \quad (7)$$

$$2L \left(\frac{\Delta n_s}{\lambda_s} - \frac{\Delta n_e}{\lambda_e} \right) > 1 \quad (8)$$

が条件式となる。添字の s は掃引開始波長、 e は終了波長を表す。Fig. 8 は d_{33}^{LN} に対して波長掃引の中心波長を 1.5 ~ 1.6 μm としたときに、式(8)の条件を満たす境界を示したグラフである。波長掃引範囲が広いほど、薄いサンプルの計測が可能であることが読み取れる。

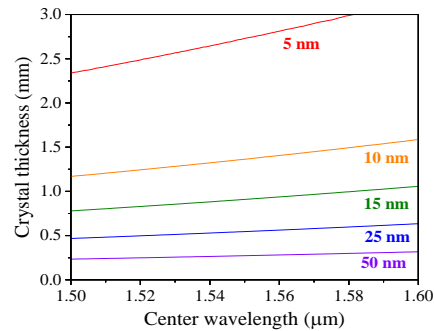


Fig. 8 Under limit of crystal thickness of a sample according to center wavelength and wavelength tuning range in the case of d_{33}^{LN} .

現在はこの計測理論に基づいた波長掃引光源の設計中である。

<引用文献>

- [1] P. D. Maker, R. W. Terhune, M. Nisenoff, and C. M. Savage, Phys. Rev. Lett., 8, 21 (1962).
- [2] A. Yariv, 光エレクトロニクス 原書 5 版 (丸善株式会社, 2000) p. 408.
- [3] 菊地優一, 佐々木雄三, 水津光司, 原武文, 横山弘之, 伊藤弘昌, 平成 16 年度電気関係学

会東北支部連合大会 1J-08 (2004).
 [4] S. R. Marder, J. W. Perry, and W. P. Schaefer: Science, 245, 626 (1989).
 [5] R. C. Miller, Appl. Phys. Lett., 5, 17 (1964).
 [6] I. Shoji, T. Kondo, A. Kitamoto, M. Shirane, and R. Ito, J. Opt. Soc. Am. B, 14, 2268 (1997).
 [7] R. C. Eckardt, H. Masuda, Y. X. Fan, and R. L. Byer, IEEE J. Quant. Elect., 26, 922 (1990).
 [8] S. Q. Chen, W. P. Zang, Z. B. Liu, W. Y. Zhou, Y. F. Kong, and J. G. Tian, Opt. Commun., 274, 213 (2007).
 [9] H. Ito, K. Suizu, T. Yamashita, A. Nawahara, and T. Sato, Jpn. J. Appl. Phys., 46, 7321 (2007).
 [10] U. Meier, M. Bösch, Ch. Bosshard, F. Pan, and P. Günter, J. App. Phys., 83, 3486 (1998).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Cyril Bernerd, Patricia Segonds, Jérôme Debray, Takashi Notake, Mio Koyama, Hiroaki Minamide, Hiromasa Ito, and Benoît Boulanger, "Quadratic nonlinear optical properties of the organic N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline (BNA) biaxial crystal," Opt. Lett., 査読有, 43, 1818-1821 (2018).

② 小山 美緒, 野竹 孝志, 伊藤 弘昌, 南出 泰亜, "非位相整合第二高調波発生による光学結晶の品質計測と非線形係数相対評価," レーザー研究, 査読有, 45, 12, 773-778, (2017).

[学会発表] (計 6 件)

① 小山 美緒, 野竹孝志, 伊藤弘昌, 南出 泰亜, "無機・有機非線形光学結晶の位相不整合 SHG による非線形係数相対評価," 第 18 回「ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ」, 2018 年 02 月 22-23 日. 【ポスター】

② 小山 美緒, 野竹 孝志, 伊藤 弘昌, 南出 泰亜, "非位相整合 SHG による非線形光学結晶の面内品質計測および非線形係数相対評価装置の開発," 理研シンポジウム第五回「光量子工学」, PS-55, 仙台市中小企業活性化センター (アエル) 5 階多目的ホール(2017 年 11 月 29-30 日). 【ポスター】

③ 小山 美緒, 野竹 孝志, 伊藤 弘昌, 南出 泰亜, "非位相整合 SHG を利用した非線形係数評価装置の計測精度に関する検討," 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 6p-A414-19, 福岡国際会議場 (2017 年 9 月 6 日). 【口頭】

④ 小山 美緒, 野竹 孝志, 伊藤 弘昌, 南出 泰亜, "非位相整合 SHG による有機結晶の非線形係数の相対評価," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-418-1, パシフィコ横浜 (2017 年 3 月 16 日). 【口頭】

⑤ 小山 美緒, 野竹孝志, 伊藤弘昌, 南出 泰亜, "非位相整合 SHG による非線形結晶の

面内結晶特性評価装置," レーザー学会第 503 回研究会, RTM-17-01, 宮城県仙台市 (2017 年 2 月 28 日). 【口頭】

⑥ Mio Koyama, Kouji Nawata, Yu Tokizane, Yuma Takida, Zhengli Han, Takashi Notake, Shin'ichiro Hayashi, ○Hiroaki Minamide, "High-resolution, THz-wave real-time imaging with Si-camera based on nonlinear optical up-conversion," Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO2016), ATu4J, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, (June 7, 2016). [Oral]

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
小山 美緒 (Mio Koyama)
 国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
 学研究領域・特別研究員
 研究者番号：90757147

(2) 研究分担者
 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者
 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者
 ()