

## 研究

## 銅蒸気レーザー光の第二高調波のビームパターンの測定

高瀬 智裕\*・尾松 孝茂\*\*・黒田 和男\*\*\*・田中 俊一\*

\* 東京理科大学理学部 〒162 東京都新宿区神楽坂 1-3

\*\* 千葉大学工学部 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

\*\*\* 東京大学生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木 7-22-1

(1993年1月14日受付, 1993年3月18日受理)

Beam Pattern of the Second Harmonics in  
Frequency Doubling of a Copper Vapor LaserTomohiro TAKASE,\* Takashige OMATSU,\*\* Kazuo KURODA\*\*\*  
and Syun-ichi TANAKA\*\* Faculty of Science, Science University of Tokyo,  
1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162\*\* Faculty of Engineering, Chiba University,  
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263\*\*\* Institute of Industrial Science, University of Tokyo,  
7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106

(Received January 14, 1993; Accepted March 18, 1993)

The efficiency of the second harmonic generation of a copper vapor laser beam can be improved by using anamorphic system for converging the laser beam into the nonlinear crystal. We observed the beam pattern of the second harmonics in order to investigate the mechanism of improvement. We found that the beam pattern strongly depends on the converging optical system. The results were confirmed by the simulation based upon the non-collinear interaction model. Using different anamorphic systems, we can change the beam pattern of the second harmonics. The anamorphic converging is quite useful for the frequency doubling of copper vapor lasers.

## 1. はじめに

銅蒸気レーザー (CVL)<sup>1)</sup> は可視域 (510.6 nm) で発振する高繰返し, 高出力レーザーである. その第二高調波 (SHG)<sup>2,3)</sup> は紫外域にあり, 高効率発生が可能となれば, 次世代半導体ステッパー用光源として非常に有望である.

銅蒸気レーザーは大口径レーザーであるので, 有効な第二高調波 (SH 光) を発生させるには, レーザー光を非線形結晶中に絞り込む必要がある. このため, 高効率変換を実現させるには, 銅蒸気レーザー光の指向性を向上させ, レーザー光の集光度を上げることが極めて重要であり, self-filtering 型<sup>4)</sup>, off-axis 型<sup>5-7)</sup> の不安定共振

器<sup>8,9)</sup>を用いた実験が報告されている. また, 非線形結晶  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (BBO) が一軸性結晶であることに注目し, 複屈折性による位相整合条件が課せられる面に対し直交する面内でより強く集光するアナモルフィックな集光光学系を用いて高効率変換を実現した報告<sup>10)</sup>もある.

しかし, これらは変換効率にのみ着目したものであり, SH 光のビームパターンに関する報告はない. 特に, BBO 結晶は位相整合の許容角度幅が極めて狭いので, 位相整合の課せられる面内では, SH 光のビームの広がり角度は狭くなる. ところが, それに直交する面内ではビーム角度の広がりに対する条件はない. このため, CVL の SH 光は一次元的な線状のビームパターンをもつ. ビームパターンの測定, 評価は SH 光の利用効率を

考えた場合、不可欠である。

われわれは、集光光学系に球面レンズとアナモルフィックレンズを用いた際の、SH 光のビームパターンを測定した。この結果を、non-collinear 相互作用モデル<sup>1)</sup>に従い、理論的に解析するとともに、アナモルフィック集光光学系の優位性について報告する。

## 2. アナモルフィック集光光学系による第二高調波発生

### 2.1 原理

第二高調波発生 (SHG) では、集光レンズの焦点距離が短いほど、結晶内での基本波強度が大きくなり、SHG 変換効率は向上する。しかし、銅蒸気レーザー (CVL) の第二高調波発生に用いられる BBO 結晶は一軸性結晶であり、Fig. 1 に示した屈折率楕円体を見ると、結晶の光学軸 (C 軸) と CVL の光軸 (Z 軸) の作る平面内 (以後、この平面内にあり、Z 軸に直交する軸を P 軸と呼ぶ) では、位相整合許容角が非常に狭い。そのため、集光レンズの焦点距離を短くすると、結晶に絞り込む CVL 収束光の角度 (収束角) が大きくなる分、位相不整合量が増加してしまう。CVL の集光光学系に球面レンズを使用する場合、最大変換効率は結晶内での基本波強度と位相不整合量のトレードオフで決まり、CVL 光の最適収束角が存在する。

一方、Z-P 軸平面に垂直で、CVL の光軸を含む Z-V 平面内 (以後、P 軸、Z 軸と合わせて直角系を作る方向の軸を V 軸と呼ぶ) では、位相整合の条件は存在しない。そこで、CVL 光を P 方向と V 方向に関して異なる焦点距離で集光し、Z-V 軸平面内のレーザー光を強く結晶中へ集光すれば、位相不整合量を増加させずに結晶内での CVL 強度を向上させることができる。

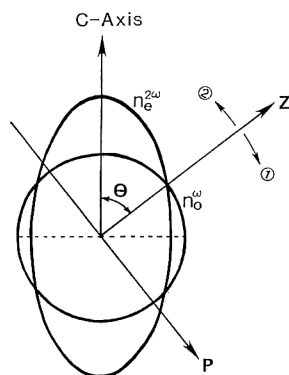


Fig. 1 A index ellipsoid at the CVL line (510.6 nm).

### 2.2 実験

測定において使用した CVL 装置は、off-axis 型不安定共振器、共振器倍率 60 倍、レーザー管口径 20 mm、繰返し周波数 4 kHz で、波長は 510.6 nm のラインを用いている。BBO 結晶は 5.0 mm×5.5 mm×6.7 mm である。実験配置図を Fig. 2 に示す。まず、CVL 出力 1.0 W において、球面レンズ集光光学系の場合の SHG 変換効率を測定した。この結果を Table 1 (a) に示す。最適焦点距離は 400 mm で、そのときの変換効率は約 8.4% であった。

次に、アナモルフィックな集光光学系を用いて、SHG

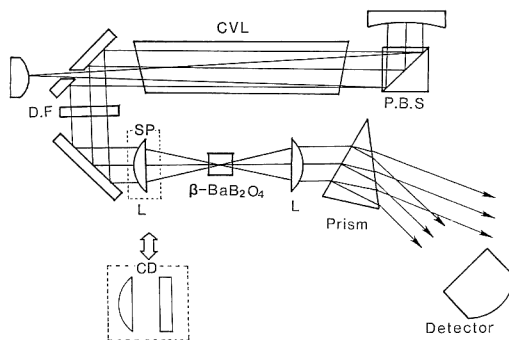


Fig. 2 The experimental setup for the second harmonic generation of a copper vapor laser. "SP" means a spherical lens. "CD" means a anamorphic optical system, which consists of two cylindrical lens.

Table 1 The conversion efficiency vs. focal length of spherical lens (a) and vs. anamorphic optical system (b).

(a)		
Focal length (mm)		SHG efficiency (%)
200		6.2
300		7.1
400		8.4
500		6.8
(b)		
Focal length for P-axis (mm)	Focal length for V-axis (mm)	SHG efficiency (%)
400	100	10.2
400	150	10.8
400	200	12.1
500	200	11.4
500	300	10.5
500	400	10.8

変換効率を測定する. CVL を 2 枚のシリンドリカルレンズを用いて, P 方向と V 方向にそれぞれ別々に集光し, 2 枚のレンズの共焦点位置に BBO 結晶を配置する. さまざまな焦点距離のシリンドリカルレンズを組み合わせて測定した結果のうち, 変換効率の高いものを Table 1(b) に示す. 最大変換率は, P 方向のレンズの焦点距離が 400 mm, V 方向のレンズの焦点距離が 200 mm のときであった. このときの変換率は約 12% で, 球面レンズ (焦点距離 400 mm) での最大変換率の約 1.4 倍である.

### 3. 第二高調波 (SH 光) のビームパターンの測定

上記の実験から, CVL 光の集光に適切なアナモルフィック光学系を用いることによって, 変換率が上昇することが確認された. 次に SH 光のビームパターンを測定した.

Fig. 3 には SH 光のビームパターンの一例を示す. SH 光は位相整合条件のない V 方向については広範囲に発生するが, 許容角の小さい P 方向については発生領域は非常に小さい. ビームパターンの測定は, まず, 発生する SH 光を焦点距離 400 mm の球面レンズでコリメートして, このビーム断面内に, 有限の大きさをもつスリット (幅 0.01 mm, 長さ 1 mm) を挿入し, それぞれ, P 軸方向, V 軸方向に一次的に掃引する. このスリットを通過する SH 光強度を測定し, ビームパターンを算出する. ここで, V 方向にはビーム全体を挿引して, P 方向は中央部分の 1 ラインを挿引してそれぞれの方向のビームパターンを算出した. V 方向はビーム全体を挿引するので, 得られる結果 (強度分布) の位置に関する積分値が全 SHG 出力を表すことになる. ビームパターンのピーク位置の強度をピーク強度と定義する. SH 光の発生範囲は, CVL ビームが BBO 結晶へ集光される角度に大きく依存すると考えられるので, CVL ビームが集光される角度を CVL の収束角度, SH 光の発生する

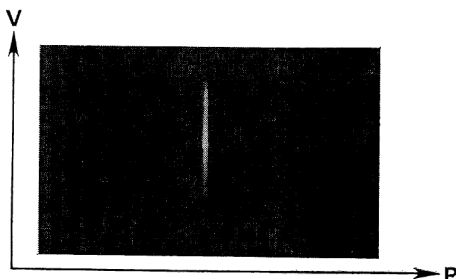


Fig. 3 A image of the beam pattern of the SH.

方向と CVL の光軸 (Z 軸) との間の角度を SH 光出射角度と定義する.

CVL 集光光学系に, 焦点距離が 400 mm の球面レンズを用いた場合 (A), 焦点距離が 200 mm の球面レンズを用いた場合 (B), 焦点距離が 400 mm (P 軸方向) と 200 mm (V 軸方向) のシリンドリカルレンズを用いた場合 (C) についてのビームパターンの比較をした.

Fig. 4(a) は V 方向のビームパターンである. SH 光の出射角広がり, Fig. 4(a) において, SH 光の強度分布全体の幅で定義すると, (A)(B)(C) の各集光光学系の場合は, それぞれ, 33 mrad, 59 mrad, 58 mrad となる. これは, V 方向の CVL 収束角度 ((A)(B)(C) の順に 35 mrad, 70 mrad, 70 mrad) に対して, 95%, 84%, 83% の割合であり, SH 光の V 方向の出射角広がり, CVL の V 方向の収束角度とほぼ等しいことが確かめられた.

各集光光学系で, SH 光が全く同じように発生していると仮定すると, Fig. 4(a) に示した V 方向の SH 光の

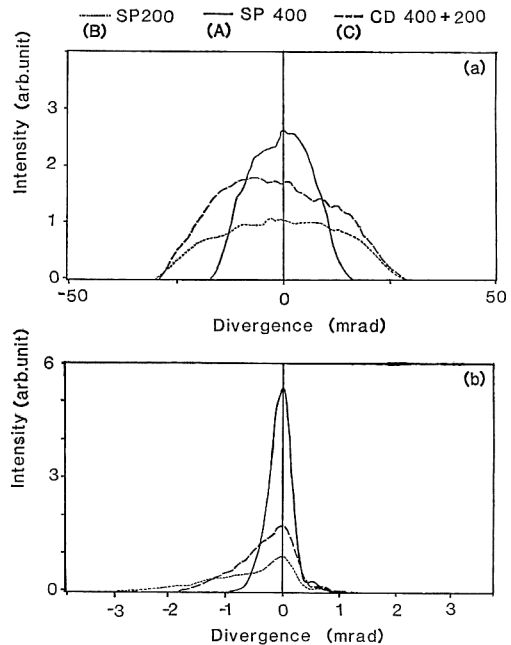


Fig. 4 (a) The experimental results of the beam pattern for V-axis. (b) The experimental results of the beam pattern for P-axis. "SP 400(A)" is a spherical lens with the focusing length of 400 mm. "SP 200(B)" is a spherical lens with the focusing length of 200 mm. "CD 400+200(C)" is a anamorphic system, which consists of two cylindrical lenses with the focusing length of 400 mm for P-axis and 200 mm for V-axis respectively.

ピーク強度は、V方向のCVLの収束角度に反比例する。この場合、集光光学系(B)(C)でのピーク強度は、(A)のときの約50%になるはずであるが、実験結果をみると、それぞれ、40%、70%である。これは、出射角度の小さい(Z軸近傍)SH光の発生が、集光光学系(C)では、(A)や(B)の場合より効率よく行われていることを示す。

次にFig. 4(b)にP方向のビームパターンを示す。P方向に関しては位相整合の許容度が低く、CVL収束角度に対してSH光出射角広がり是非常に小さい。その値は、集光光学系(A)のときは1.9 mrad、(B)のときは4.5 mrad、(C)のときは3.1 mradであり、SH光出射角広がりが大きくなるにつれ、ピーク強度も低下する。

この結果について注意すべき点が二つある。一つは、集光光学系(A)のときのビームパターンは、かなり対称な形をしているのに対し、(B)(C)のときは明らかに非対称になることである。もう一つは、集光光学系(A)と(C)でSH光の出射角広がりが大きく異なる点である。両者は、CVLのP方向の収束角度が等しい((A)(C)ともに40 mrad)にもかかわらず、SH光の出射角広がり(P軸方向)は(C)のほうが約1.5倍大きい。これは、SH光のP方向のビームパターンが、CVLのP方向の収束角度だけで決定されているのではないことを意味している。

この事実を確認するため、次のような実験を行った。P方向に平行なスリットをCVLビームに入れて遮光し、V方向のCVL収束角度を制限する。この時のP方向のSH光のビームパターンを測定した。幅4 mmのスリットを設置すると、(A)(C)のV方向のCVL収束角度は、それぞれ、35 mradから8.8 mrad、70 mradから17.5 mradに低下する。これは、P方向のCVL収束角度(ともに40 mrad)に比べて非常に小さくなっている。

Fig. 5(a), (b)に測定結果を示す。実線で示したのはスリットが無いときの結果であり、点線で示したのはスリットを設置したときのものである。Fig. 5(a)は集光光学系(A)のときの結果で、スリットを置いてもSH光の出射角広がりほとんど変わらない。これは、SH光の出射角広がりV方向ではなく、P方向の収束角度の大きさに決定されていることを示す。一方、Fig. 5(b)に示した集光光学系(C)の結果を見ると、本来、3 mrad程度の大きさをもっていたSH光出射角広がり、スリット設置時には、集光光学系(A)のときとは

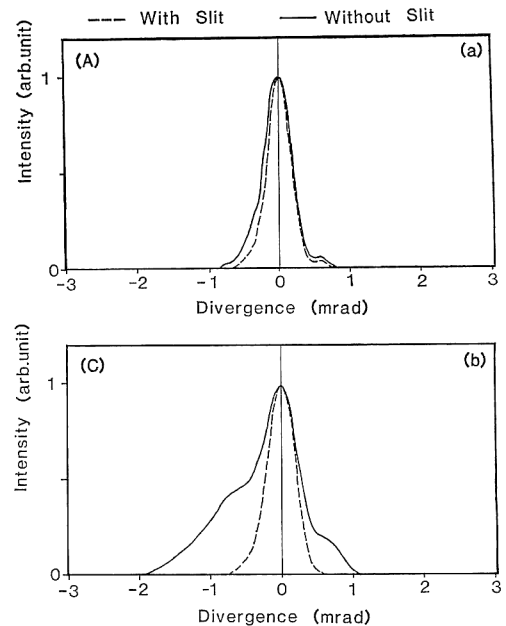


Fig. 5 The experimental results of the beam pattern for P-axis in the cases of the limited beam (.....) and the not limited beam (—) of the CVL for V-axis. (a) The spherical lens with the focusing length of 400 mm. (SP 400(A)). (b) The anamorphic system, which consists of two cylindrical lenses with the focusing length of 400 mm for P-axis and 200 mm for V-axis respectively. (CD 400+200 (C))

は同じ1.4 mrad程度まで低下する。これは、スリットが無いときにはV方向の収束角度によって決まっていたSH光の出射角広がり、スリット設置時にはP方向の収束角度で決まることを示している。

この結果、P方向のSH光の出射角広がり、P方向だけでなく、V方向も含めたCVL収束角度の最大値によって決定されることがわかった。

## 4. 理 論

### 4.1 Non-collinear 相互作用モデル<sup>11)</sup>

CVLは部分的コヒーレント光であるために、通常のコヒーレントなビームにおけるSHGの理論は成り立たない。このようなレーザー光に適合できる理論である、non-collinear相互作用モデルを用いてSH光のP方向のビームパターンを理論計算した。

この理論について簡単に説明する。集光されたCVLビームを異なる $k$ ベクトルをもった $n$ 本のコヒーレントな光線束の集まりとして考える。このとき、CVLの指向性が $\Delta\theta$ 、集光する球面レンズの焦点距離が $f$ であ

るならば、光線束の断面は直径  $2f\Delta\theta_0$  の円となる。一方、アナモルフィックスレンズの場合、断面は長軸、短軸が、それぞれP、V方向の集光レンズで決まる楕円になると考える。BBO結晶に入射されたこれらの光線束のうち、任意の2本の光線束が相互作用してSH光を発生する。位相整合しなければならないため、SH光は任意の2本のCVL光線の持つ波数ベクトル  $k_i, k_j$  の和の方向に発生するが、 $|k_i|=|k_j|$  であるため、それは波数ベクトルのなす角  $2\psi$  の二等分方向となる。2本のCVL光線束の相互作用によるSHGのパワー  $P_{2\omega ij}$  は簡略化すると次のように与えられる。

$$P_{2\omega ij} = V_{ij} G_{ij} P_{\omega i} P_{\omega j} (L/S_0)^2 \text{sinc}^2(\Delta k L) \quad (1)$$

ここで、 $L$  は相互作用長 (位相整合できる長さ)、 $G_{ij}$  は2本の光線束の強度相関関数、 $P_{\omega i}, P_{\omega j}$  はCVLパワー、 $S_0$  は光線束の断面積でシリンドリカルレンズを使用しているときは楕円になるとする。 $V_{ij}$  はBBO結晶の非線形定数と相互作用の大きさに関するファクターである。 $\Delta k$  は位相不整合量である。全SHG出力  $P_{2\omega}$  は、任意の2本のCVL光線束から発生するSHG出力の総和となる。

#### 4.2 SH光のビームパターンの非対称性について

SH光のP方向のビームパターンの非対称性について考える。タイプIの位相整合をとるとき、位相不整合量は次のように書き換えることができる。

$$\Delta k = 2(n_e^{2\omega}(\theta) - n_o^\omega \cos \psi)\omega/c \quad (2)$$

$\omega$  はCVLの角周波数、 $c$  は光速、 $n_o^\omega$  は基本波 (常光線) の屈折率、 $n_e^{2\omega}(\theta)$  は2倍波 (異常光線) の屈折率、 $\theta$  はBBO結晶の光学軸とCVLの光軸がなす角、 $\psi$  は二つの光線束のなす角の半角である。式(1)より、SH光の発生効率は  $\Delta k=0$  のとき、最も大になる。ここで Fig. 1 に示した屈折率楕円体をみると、 $|\cos \psi| \leq 1$  であるために、 $\Delta k=0$  を可能にするのは、 $n_e^{2\omega} \leq n_o^\omega$  となる①方向のみである。しかも、2本の光線束のなす角  $2\psi$  が大きくなるほど、 $\Delta k=0$  を満たすSH光の発生方向は①方向に傾いていく。集光光学系(B)のときにビームパターンの非対称性が最も顕著に現れた原因は、CVL収束角度が最も大きく、なす角  $2\psi$  の大きな2本の光線束を選択可能であったためと考えられる。

#### 4.3 SH光のビームパターンの理論計算

Non-collinear相互作用モデルに基づいてP方向のビームパターンの計算を行う。実験では、V方向のピーク強度を与える位置 (P軸上になる) でP方向のビームパターンを測定した。P軸上で観測されるSH光は、Z軸に関して対称な2本の光線束どうしの相互作用だけで

発生したものと考えてよい。これらの光線束ペアにより発生するSH光強度をすべて加算してビームパターンを算出した。

結晶内では複屈折により、SH光のエネルギーの伝搬方向はZ軸から  $0.08 \text{ rad}$  だけP方向に傾く。そのため、相互作用長  $L$  は、光線束のP方向の幅  $S_p$  (P方向の集光レンズの焦点距離  $f_p$ 、CVLの指向性  $\Delta\theta_0$  を用いて、 $S_p=2f_p\Delta\theta_0$ ) を用いて、近似的に式(5)で与えられる。

$$L = S_p/0.08 \quad (3)$$

また、2本の光線束の強度相関関数  $G_{ij}$  は

$$G_{ij} = 1 + |\gamma_{ij}|^2 \quad (4)$$

$$\gamma_{ij} = \text{sinc}(2\pi\psi f \Delta\theta_0/\lambda) \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $f$  はレンズの焦点距離、 $\Delta\theta_0$  はCVLの指向性、 $\lambda$  はCVLの波長である。ただし、 $f$  はアナモルフィックな集光光学系では、長焦点レンズの焦点距離 (P方向) とした。また、 $V_{ij}$  は、2本の光線束が重なる領域の容積で近似した。

実験に使用したCVLの指向性の平均値は、 $0.05 \text{ mrad}$  程度であるが、これは、CVLの遠視野像において全光強度の1/2の大きさをもつエネルギーサークルを仮定し、その径から算出したものである。しかし、SH光の出射角広がり、CVLの遠視野像全体の大きさによって決まり、これをもとに指向性を算出すると  $0.1 \text{ mrad}$  程度になる。そこで、この値を用いて、SH光のビームパターンの計算を行った。

#### 4.4 計算結果

Fig. 6 に、計算結果を示す。これを見ると、集光光学系(A)のときは、ビームパターンがほぼ対称であるの

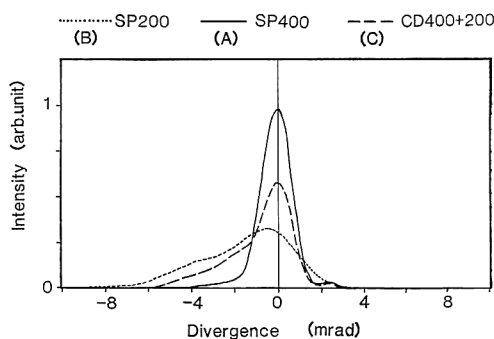


Fig. 6 The calculation results of the beam pattern for P-axis. "SP 400(A)" is a spherical lens with the focusing length of 400 mm. "SP 200(B)" is a spherical lens with the focusing length of 200 mm. "CD 400+200 (C)" is an anamorphic system, which consists of two cylindrical lenses with focusing length of 400 mm for P-axis and 200 mm for V-axis respectively.

に対し、(B)(C)のときには非対称に広がる傾向が現れ、その比はともに約2:1になっている。この比率は、実験結果と非常に良く一致している。SH光の分布広がりには全体的に実験結果の2~3倍程度大きくなっているが、指向性がレーザー光のパルス内で時間変化していることや、本来、相互作用領域内での位置によって値の異なる相互作用長を一定値で近似していることがその原因と考えられる。

この計算結果から、SH光は異なる $k$ ベクトルをもつCVL光線束どうしのnon-collinearな相互作用によって発生し、そのビームパターンの変化は、相互作用を3次元的に取り扱うことで、説明できることが明らかになった。

### 5. アナモルフィック集光光学系の優位性

SH光を利用する上での大きな障害は、P方向のSH光の発生範囲が非常に小さいことである。これに関しては、CVLの収束角度を大きくすることにより、わずかながら改善できる。その際、P方向の収束角度の増加

は、位相不整合量 $\Delta k$ の増加を伴うためにSHG変換効率が大幅に低下するが、V方向の場合は位相不整合量 $\Delta k$ の増加を伴わない。アナモルフィック集光光学系では、CVLの収束角度をP方向、V方向に関して別々に制御できるため、球面レンズ集光光学系より、SHG出力に関して有利となる。

一方、SH光の発生範囲より、ピーク強度の大きさが要求される場合には、CVL収束角度の小さい集光光学系を選択すればよい。Table 1によると、変換効率が高く、CVL収束角度の小さい集光光学系は焦点距離400mmの球面レンズを用いた場合(A)と、焦点距離が500mm(P軸方向)と400mm(V軸方向)のシリンダリカルレンズを用いた場合(D)である。Fig. 7(a), (b)に、これらの集光光学系を用いた場合のSH光のP方向のビームパターンの測定結果と計算結果を示す。これを見ると、集光光学系(D)の場合は、集光光学系(A)に比べ、結晶内のCVL強度が低下するものの、位相不整合量 $\Delta k$ の減少の効果が大きくなるため、ピーク強度が大きくなる。この結果、ピーク強度の大きなSH光の要求に対しても、アナモルフィックな集光光学系を用いたほうが有効であるといえる。

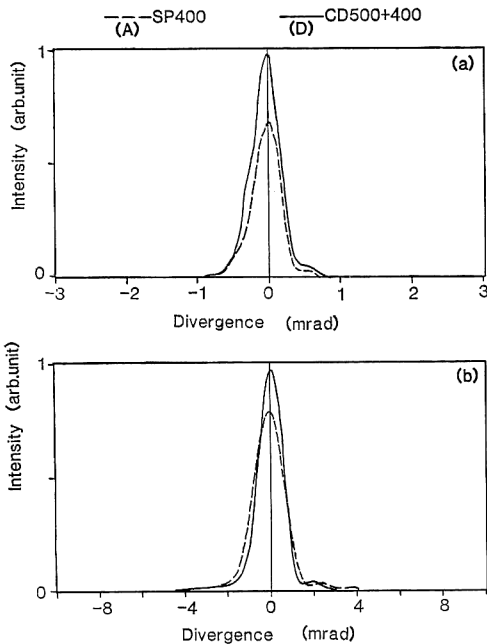


Fig. 7 The comparison of the beam pattern for P-axis. (a) The experimental results. (b) The calculation results. "SP 400(A)" is a spherical lens with the focusing length of 400 mm. "CD 500+400(D)" is a anamorphic system, which consists of two cylindrical lenses with the focusing length of 500 mm for P-axis and of 400 mm for V-axis respectively.

### 6. ま と め

SH光のビームパターンを測定した。V方向のビームパターンは、結晶に入射するCVLのビームパターンとほぼ同一である。一方、P方向は、位相整合条件が厳しいために、SH光の発生が極めて狭い範囲に限定される。このため、CVLのSH光はV方向に長い線状光源となる。また、P方向のビームパターンは、実験とnon-collinearモデルを用いた理論計算の比較から、CVL光線束の3次元的な相互作用によって決定していることが明らかになった。この結果、P方向のビームパターンは、結晶へのCVL収束角度が大きくなると、非対称性が現れるものの、発生範囲は増加する。

技術的な見地からは、アナモルフィック集光光学系を用いてSHGを行うと、高い変換効率を保ったまま、目的に応じたビームパターンを得ることが可能であり、球面レンズ集光光学系よりも有利であることが明らかになった。

### 文 献

- 1) W. T. Walter, N. Solimene, M. Piltch and G. Gould: "6C3-Efficient pulsed gas discharge lasers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-2** (1966) 474-479.
- 2) K. Kuroda, T. Omatsu, T. Shimura, M. Chihara

- and I. Ogura: "Parametric study on the second harmonic generation of a copper vapor laser," Proc. SPIE, **1041**, Metal Vapor, Deep Blue, and Ultraviolet Lasers (1989) 60-66.
- 3) D. W. Coutts, M. D. Ainsworth and J. A. Piper: "Sum frequency mixing of copper vapor output in KDP and  $\beta$ -BBO," IEEE J. Quantum Electron., **QE-25** (1989) 1985-1987.
  - 4) R. Bhatnagar, S. K. Dixit, J. K. Mittal, B. Singh, S. V. Nakhe and K. K. Sharangpani: "A copper vapor laser with a positive branch self-filtering unstable resonator," Opt. Commun., **82** (1991) 557-562.
  - 5) A. J. Kearsly, G. A. Naylor and R. R. Lewis: "Optimization of resonator design for large-volume short-pulse copper vapour lasers," *Tech. Dig. Opt. Soc. Am. Conf. Lasers, Electro-Opt* (Washington, DC, 1987) paper MG 1.
  - 6) D. W. Coutts, M. D. Ainsworth and J. A. Piper: "Enhanced efficiency of UV second harmonic and sum frequency generation from copper vapor lasers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-26** (1990) 1555-1558.
  - 7) 高瀬智裕, 尾松孝茂, 黒田和男, 田中俊一: "Off-axis 型不安定共振器を用いた銅蒸気レーザー光のビームクオリティの評価", 光学, **21** (1992) 457-463.
  - 8) A. E. Siegman: "Unstable optical resonators for laser applications," Proc. IEEE, **53** (1965) 277-287.
  - 9) A. E. Siegman and H. Y. Miller: "Unstable optical resonator loss calculations using the prony method," Appl. Opt., **9** (1970) 2729-2736.
  - 10) D. W. Coutts and J. A. Piper: "One watt average power by second harmonic and sum frequency generation from a single medium scale copper vapor laser," IEEE J. Quantum Electron., **QE-28** (1992) 1761-1764.
  - 11) T. Omatsu, K. Kuroda, T. Shimura, M. Chihara, M. Itoh and I. Ogura: "Non-collinear interaction model of the second harmonic generation of a copper vapor laser," Opt. Commun., **79** (1990) 125-130.