

研究

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

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

** 東京大学生産技術研究所 〒106 東京都港区六本木 7-22-1

(1992年3月7日受付, 1992年4月2日受理)

Beam Quality of a Copper Vapor Laser with Off-axis Type Unstable Resonator

Tomohiro TAKASE,* Takashige OMATSU,** Kazuo KURODA** and Shunichi TANAKA*

* Faculty of Science, Science University of Tokyo,
1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162

** I. I. S. University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106

(Received March 7, 1992; Accepted April 2, 1992)

We have measured spatial coherence and beam divergence of a copper vapor laser (CVL) beam with temporal resolution of 1 ns. Two types of unstable resonators, on-axis and off-axis, were investigated. The beam divergence of the off-axis type was smaller than that of the on-axis one, whereas the spatial coherence was almost same in both types. We calculated far field patterns of CVL beams by taking into account spatial coherence and near field patterns. It was found that the better divergence of the off-axis type is caused by its unique near field pattern which has a hole on the side of beam.

1. はじめに

銅蒸気レーザー (CVL)¹⁾は発振波長 510.6 nm (緑), 578.2 nm (黄) を持つ高出力 (~20 W) 高繰り返し (~5 kHz) 大口径 (~80 mm) の短パルス (~40 ns) レーザーである。CVL はゲインが非常に大きいため、数多くの横モードが立ちやすく、ビームクオリティが悪い。このビームクオリティを向上させるために通常、不安定共振器^{2,3)}を用いるが、これには光軸上でレーザー発振させる on-axis 型と、軸外で発振させる off-axis 型とがある⁴⁾。

CVL の第 2 高調波発生 (255.3 nm)^{5,6)}は高効率化が可能となれば、高出力、高繰り返し紫外光光源となる可能性がある。変換効率の向上には CVL のビームクオリティの改善が不可欠とされる中で、off-axis 型不安定共振器構成の CVL を用いた、第 2 高調波発生の高効率化が報告されている⁷⁾。しかしながら、off-axis 型不安

定共振器のレーザー光に関して、ビームクオリティを定量的に測定した報告はない。さらに、光の共振器内滞在時間が非常に短い CVL では、このビームクオリティは 1 パルス内で大きく変化する。

われわれは、ストリークカメラを用いて、CVL の空間的コヒーレンスと指向性を、on-axis 型、off-axis 型の両者の場合にて時間分解測定した。その結果を報告する。さらに相互強度の伝搬から、on-axis 型、off-axis 型における空間的コヒーレンスと指向性の関係を計算した。この結果についても実験結果と合わせて考察する。

2. 空間的コヒーレンスの測定

2.1 空間的コヒーレンスの測定方法

空間的コヒーレンスとは、光軸に垂直な平面上での任意の 2 点における場の相関であり、相関が大きな光ほど、レンズで絞ったときの集光度が高くなる。空間的コヒーレンスは、通常、ヤングの干渉計を用いて測定する

が⁹⁾, この場合, 干渉縞のコントラストがゼロになる二つのピンホール間隔を探さなければならず, nsオーダーでの時間分解測定は非常に困難である.

われわれは, 波面反転型干渉計を用いて測定した⁹⁻¹¹⁾.

Fig. 1(a)にこれを示す (点線で囲まれている部分の光学系). 入射光(波面 ABC)を BS_1 で二つの光路に分け, 光路 Σ_1 を進む光は2枚のミラーを経て, 光路 Σ_2 のほうは3枚のミラーを経て BS_2 に到達する. このとき, ミラー枚数が1枚だけ異なるので, 光路 Σ_1 を進んだ光の波面は入射光波面が左右反転した CBA に, 光路 Σ_2 のほうは入射光と同じ ABC になっている. その結果, ビームの中心軸である Y 軸上では入射光波面の同じ位置 B と B が, その両サイドでは入射光の左右対称な位置 A と C が, BS_2 で重ね合わせられる. この結果, 得られる干渉縞は, その中心部から周辺部へシャリング量が Y 軸からの距離の2倍で連続的に変化する. 干渉縞画像の折り

返しである Y 軸に対して垂直な方向に沿って一次元的にコントラストを観測すれば, コヒーレンス関数が即座に得られる. 時間分解して測定するためには, この干渉縞をストリークカメラのスリット面上に結像する. 得られる干渉縞の時間掃引画像を CCD カメラで読み取り, これをパーソナルコンピュータに取り込んで時間軸に沿って 1 ns の分解能でサンプリングし, フーリエ変換を用いてそれぞれのコヒーレンス関数を算出する.

2.2 空間的コヒーレンスの測定結果

われわれの使用した CVL 装置は, レーザー管口径 20 mm, 放電長 80 cm, 共振器長 3 m, 緑り返し周波数 4 kHz, 共振器構成は正枝共焦点型不安定共振器, 共振器倍率 60 倍 (共振器ミラーの曲率半径 6 m, -10 cm) である. 測定は, **Fig. 1(b)**に示すような on-axis 型不安定共振器と off-axis 型不安定共振器の両方の場合について行った. 実験配置図は **Fig. 1(a)**に示す. CVL ビームはスペシャルフィルターによって ASE (amplified spontaneous emission) を除去してから波面反転型干渉計に入射させ, 前節で述べた方法に従って空間的コヒーレンスの時間分解測定を行う. **Fig. 2**に観測された干渉縞の掃引画像データの一例を示す. 縦軸は掃引時間を表しており, パルス全体が, この掃引時間内に納まっている. 横軸は強度分布を表し, 干渉縞の存在する部分がコヒーレントな領域を示す. これをみるとパルス後半で空間的コヒーレンスが良くなるのがわかる. 次に, 算出されたコヒーレンス関数の一例を **Fig. 3**に示す. われわれはコヒーレンス関数のピーク値の $1/e$ 以上のコヒー

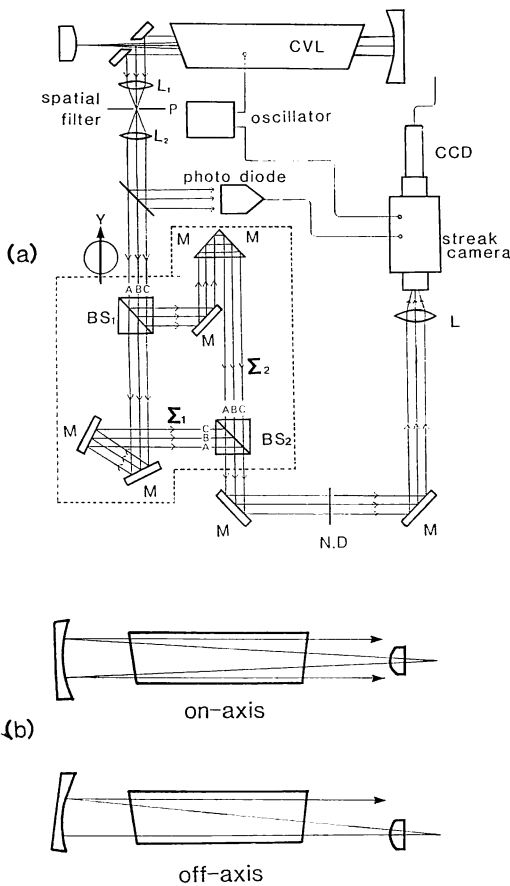


Fig. 1 (a) The experimental setup. The reversal shear interferometer is in the broken line area. (b) Designs of on-axis type and off-axis type unstable resonators.

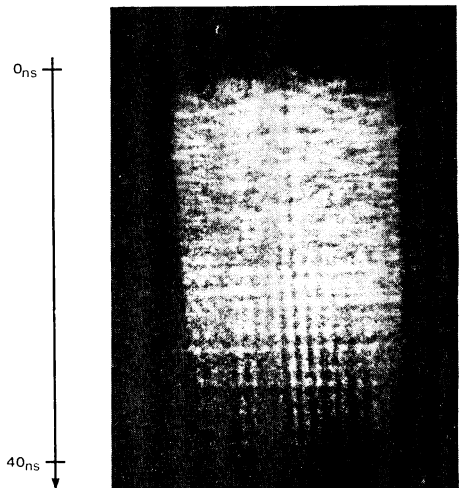


Fig. 2 A streaked image of the interference fringes.

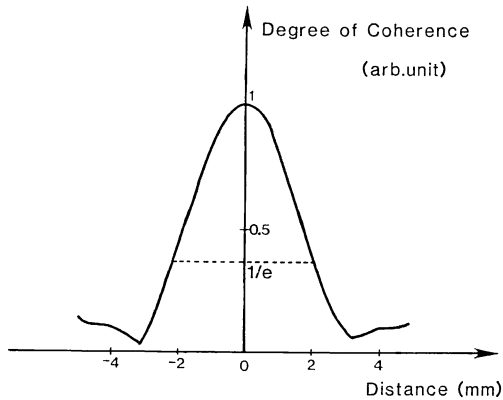


Fig. 3 The coherence function at 8 ns from the laser oscillation. The laser power is 2 W in the 510.6 nm line. Coherence width is defined as the first shearing, at which the degree of coherence becomes $1/e$.

レンズ度を持つ領域を、コヒーレンス幅 (点線で示される幅) と定義し、空間的コヒーレンスを表す指標とした。

Fig. 4 に CVL 装置の充電電圧が 13 kV 時の空間的コヒーレンスの時間分解測定結果を示す。(a) が on-axis 型で、(b) が off-axis 型の場合である。Fig. 4 に点線で示したパルス波形は、充電電圧が 13 kV 時の典型的な形で、レーザー出力が約 1.5 W 時のものである。パ

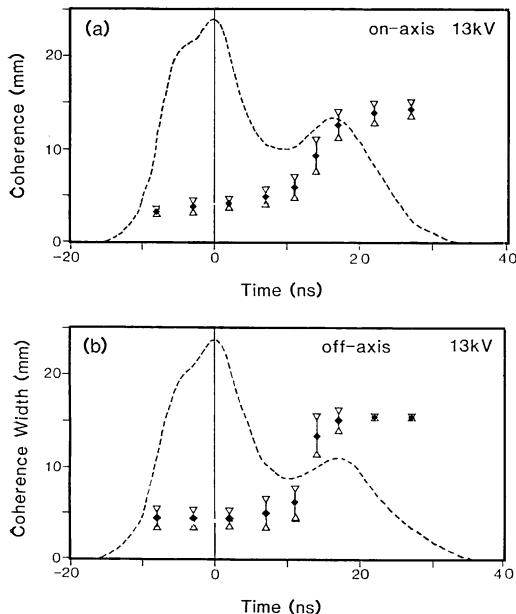


Fig. 4 The temporal change of the coherence width at the discharge voltage of 13 kV. Broken line is the pulse shape, (a) with on-axis type, (b) with off-axis type.

ルス波形をみると、両者にはほとんど差異がない。コヒーレンス幅は、パルス波形中の強度のピーク位置を時間原点にとると、ピーク後 10 ns までは on-axis 型がおおよそ 4 mm から 6.5 mm に、off-axis 型がおおよそ 4.5 mm から 6.5 mm に連続的に変化する。しかし、on-axis 型、off-axis 型ともにピーク後 10 ns あたりでステップ関数状にコヒーレンス幅は大きくなり、その後はビーム径 (約 17 mm) を越えてしまう。

これらより、空間的コヒーレンスはパルス後半 (ピーク後 10 ns) で急激に向上して完全にコヒーレントになること、パルス波形および空間的コヒーレンスは、on-axis 型と off-axis 型との間で全く差異のないことが判明した。

3. 指向性の測定

3.1 指向性の測定方法

指向性とはビームの遠視野像の広がりを表す指標である。広がりが小さいほど指向性が良いという。指向性の定義には、遠視野像の強度の分散をとるなどさまざまな方法が提案されている¹²⁾。われわれは、指向性をビーム広がり半角 $\Delta\theta$ で定義し、第 2 高調波発生には集光された光のエネルギー密度が大きく寄与するので、次に示すような方法でこれを算出した。**Fig. 5(a)** に示されるように、遠視野像はピーク位置を中心とした軸対称にな

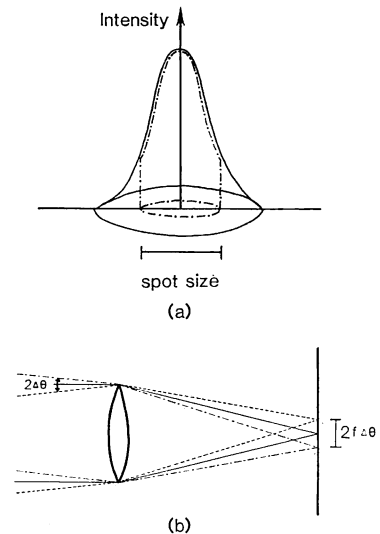


Fig. 5 (a) Definition of the spot size. We defined the spot size as the diameter of the central circle, including a half of sum energy. (b) Definition of the beam divergence $\Delta\theta$, which is given by $\Delta\theta = s/2f$. (s : spot size, f : focal length.)

ると仮定し、このピーク位置を中心とするエネルギーサークルを考える。このうち、全エネルギーの1/2に相当する中心領域の幅をスポット径 s とする。また、Fig. 5 (b) に示されるように、CVL の指向性 $\Delta\theta$ 、レンズの焦点距離 f 、遠視野でのスポット径 s の間には

$$s = 2f\Delta\theta \quad (1)$$

なる関係が成り立つ。CVL の遠視野像を測定し、上記に述べた方法でスポット径 s を決定し、指向性 $\Delta\theta$ を算出する。時間分解して測定するためには、空間的コヒーレンスの場合と同様にストリークカメラを用いて遠視野像の掃引画像を得る。この結果をパーソナルコンピュータに取り込んでパルス内各時刻でのスポット径 s を算出すれば、指向性の時間分解測定ができる。

3.2 指向性の測定結果

指向性の測定において用いた CVL は、空間的コヒーレンスの測定の時と同じである。スペシアルフィルターによって ASE を除去したビームを、 $f=1500$ mm の長焦点レンズで絞り、その焦点面をストリークカメラのスリット面に一致させる。このようにして得られた遠視野像の時間掃引画像を Fig. 6 に示す。時間とともにビームスポットが小さくなるのがわかる。

Fig. 7 には指向性の時間分解測定結果を示す。空間的コヒーレンスの場合と同様にしてパルスピークに時間原点をとると、ピーク後 8 ns あたりまで、指向性はゆるやかに向上していく。その値は on-axis 型では 0.058 mrad から 0.050 mrad、off-axis 型は 0.052 mrad から 0.049 mrad である。この部分では、指向性は off-axis 型のほうがわずかに良い。ピーク後 8 ns 以降になると、指向性は両者とも急速に向上し始め、10 ns 以降は off-axis 型にその傾向が強く現れる。そして、光パルスの

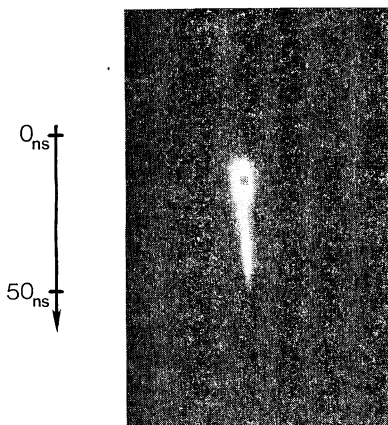


Fig. 6 A streaked image of the far field pattern.

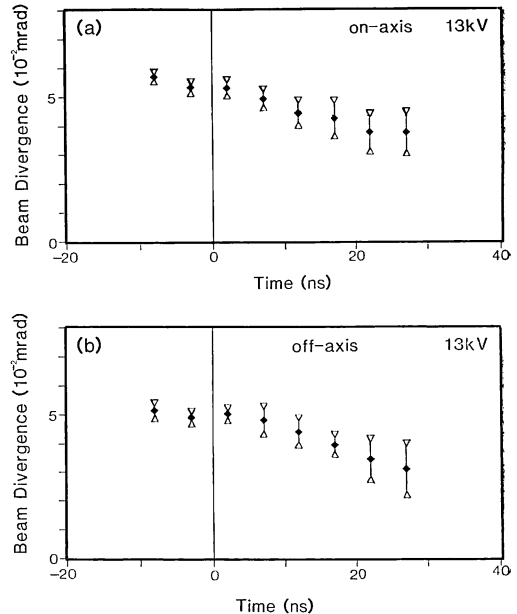


Fig. 7 The temporal change of the beam divergence at the discharge voltage of 13 kV, (a) with on-axis type, (b) with off-axis type. We defined the zero point of the time scale as the peak of the pulse.

最後には on-axis 型が 0.040 mrad に、off-axis 型は 0.030 mrad になる。この結果、指向性はパルス内全般にわたって off-axis 型のほうが小さく、SHG には off-axis 型のほうが適していることが裏付けられた。さらに off-axis 型の指向性は、パルスの初期には on-axis 型の約 90% であったのに、パルスの最後には 75% 程度にまで小さくなっている。これはパルス後半にいくにしたがって、両者の指向性の差が顕著になることを示している。

このように、指向性はパルスのピーク後 10 ns 前後から大きく変化をするという点で、空間的コヒーレンスとよく一致する。しかし、on-axis 型と off-axis 型との間で指向性の値に大きな差を生じるという点に関しては、両者の間に差異の現れなかった空間的コヒーレンスと対照的である。

4. 空間的コヒーレンスと指向性の関係

4.1 CVL の遠視野像の計算

2. と 3. の結果から、on-axis 型と off-axis 型とでは空間的コヒーレンスに関して有意な差は現れないものの、指向性に関しては off-axis 型のほうが優れていることが判明した。これについて考察を加える。On-axis

型と off-axis 型の相違は、二つある。一つは on-axis 型が光軸上でレーザー発振するのに off-axis 型は軸外で発振する点であり、もう一つは両者の近視野像が異なる(ビーム内の穴の位置が異なる)点である。

空間的コヒーレンスは光源からの見込み角で決まるが、用いた CVL はその口径がレーザー管の長さに比べて非常に小さいため、on-axis 型と off-axis 型との間で、この見込み角に有意な差はない。測定結果でも両者の空間的コヒーレンスは一致した。一方、指向性は、近視野像の回折と空間的コヒーレンスの相加効果で決まり、on-axis 型と off-axis 型で指向性に差異が生ずる原因は、近視野像にあると考えられる。

このことを解明するため、on-axis 型と off-axis 型における CVL ビームの遠視野像を計算した。Fig. 8(a) はコリメートされた CVL ビームがレンズにより、R 面上に絞られている様子を表している。平面 Q におけるビーム断面は CVL の近視野像であり、Fig. 8(b) に on-axis 型、off-axis 型の場合を示した。CVL は部分的コヒーレント光なので、平面 Q での相互強度

$$J(q, q') = \{I(q)I(q')\}^{1/2} \text{sinc} \{ \pi(q - q')/L \} \quad (2)$$

が伝搬する。ここで、 $I(q)$ 、 $I(q')$ は平面 Q での任意の 2 点 q 、 q' での強度を表し、Fig. 8(b) に示される領域 d を用いて次のように与えられる。

$$I(q) = 1 (q \text{ が } d \text{ の内部}), 0 (q \text{ が } d \text{ の外部})$$

$$I(q') = 1 (q' \text{ が } d \text{ の内部}), 0 (q' \text{ が } d \text{ の外部}) \quad (3)$$

また、 L はコヒーレンス関数の最初の 0 点を与える位置で、コヒーレンス幅 ω によって、

$$L = 1.43\omega \quad (4)$$

と一意に決定できる。焦点面 R での相互強度は

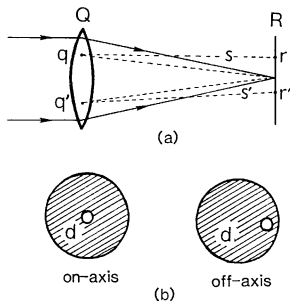


Fig. 8 (a) The calculation model. Partially coherent beam is focused on the R-plane by lens Q and we calculated the far field pattern by the propagation of mutual intensity. (b) Near field patterns of on-axis type and off-axis type. (The distribution of intensity on lens Q.) We assumed that intensity of the beam is uniform in the "d" area.

$$J(r, r') = \iint J(q, q') \exp \{ -ik(q^2 - q'^2)/2f \} \cdot \exp \{ ik(s - s') \} / ss' dq dq' \quad (5)$$

で与えられる。焦点面 R における CVL の強度分布(遠視野像)は上式において $r=r'$ とすれば求められる。

4.2 計算結果および考察

コヒーレンス幅 11 mm の場合の遠視野像の計算結果を Fig. 9(a), (b) に示す。(a) の on-axis 型の遠視野像にはサイドローブが現れるが、(b) の off-axis 型ではこのサイドローブは完全に消滅し、ガウス形に近い強度分布を得る。レーザー光のビーム断面に穴が存在する場合、その回折像はレーザー光口径により決まる回折像から、穴の口径により決まる回折像の差の絶対値で与えられる。口径が小さいほど回折像は大きくなるので、穴の回折像は、レーザー光口径の回折像よりも大きい。その結果、ビームの中央部に穴が存在する on-axis 型では、

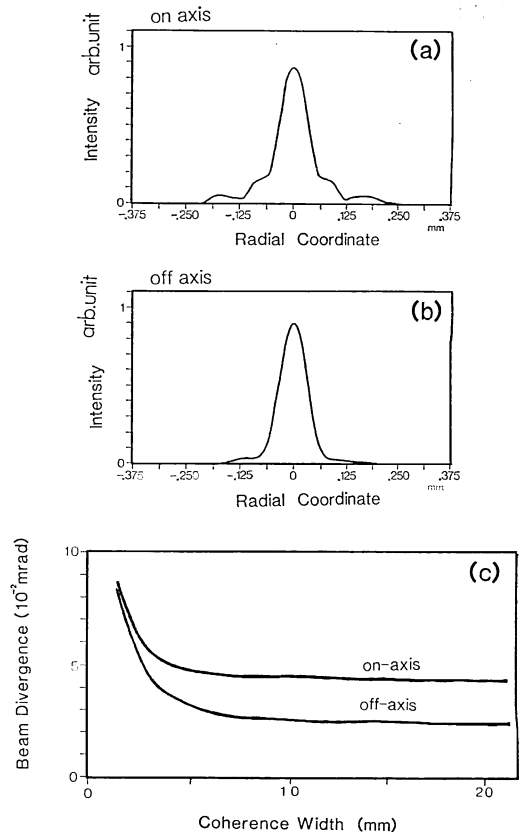


Fig. 9 (a) (b) The calculation results in far field pattern at the coherence width of 11 mm, (a) with on-axis type, (b) with off-axis type. (c) Beam divergence vs spatial coherence by the calculation.

回折像にサイドローブが現れる。一方, off-axis 型では, 穴はビーム断面の端に位置し, 回折像にほとんど影響を及ぼさない。この結果, off-axis 型は遠視野において, 光軸付近にエネルギーの大部分が集まり, スポット径 s は小さくなる。このコヒーレンス幅 11 mm の場合, off-axis 型の指向性を, 定義に従って算出すると 0.026 mrad となる。これに対して, on-axis 型はサイドローブが現れる分だけエネルギーが分散し, スポット径 s は大きくなる。この場合, 指向性は 0.045 mrad となる。これは空間的コヒーレンスが同じでも, 指向性は off-axis 型のほうが優れているという実験結果に一致している。このように, 近視野像における穴の位置が遠視野像に大きな影響を及ぼしていることが判明した。次に, この計算結果を利用して, on-axis 型と off-axis 型の両者における空間的コヒーレンスと指向性の関係を求める。コヒーレンス幅をパラメータとして計算した遠視野像から, われわれの定義した方法で指向性をそれぞれ算出し, 空間的コヒーレンスと指向性を対応させた。

この結果を Fig. 9(c)に示す。指向性は on-axis 型, off-axis 型ともにコヒーレンス幅の増加に対し単調減少となり, コヒーレンス幅が十分大きくなると, 回折限界に近づいて収束する。コヒーレンス幅が小さな値をとる

とき(2 mm 以下)には, on-axis 型と off-axis 型の指向性は, ほぼ等しいが, コヒーレンス幅が大きくなるにつれて少しずつ差が生まれ, 十分大きくなる(15 mm 以上)と off-axis 型の指向性は on-axis 型のおよそ 50% 程度になって安定する。そのときの指向性の値は on-axis 型が約 0.045 mrad, off-axis 型が約 0.025 mrad である。

次に, Fig. 9(c)の結果を利用して, 空間的コヒーレンスの実験結果(Fig. 4)を指向性に換算してみた。この結果を Fig. 10(a), (b)に示す。点線は指向性を直接測定した実験結果である。これをみると, 空間的コヒーレンスの実験結果(Fig. 4)から算出した指向性の値は, (a)の on-axis 型の場合, 実験結果と非常に良く一致することがわかる。(b)の off-axis 型では指向性の値そのものに, 若干の差があるものの, パルス内での変化の様子は実験結果とよく似ている。これは, 遠視野像の計算結果が妥当であることを示すとともに, on-axis 型と off-axis 型で指向性に差異を生じる原因が, 両者の近視野像の違いにあることを明確にしている。

5. ま と め

On-axis 型と off-axis 型の2種類の不安定共振器を用いた CVL の空間的コヒーレンスと指向性を, パルス内で時間分解して測定した。その結果, パルス波形と空間的コヒーレンスは両者とも同じ振舞いをするのに対し, 指向性は off-axis 型のほうが優れていること, 空間的コヒーレンスの良くなるパルス後半でそれは顕著になることが判明した。これが, 第2高調波発生において off-axis 型のほうが有利となる最大の要因である。さらに, この指向性が異なる原因を解明するため, on-axis 型, off-axis 型の CVL ビームがそれと同じ近視野像をもった相互強度の伝搬であると考え, コヒーレンス幅をパラメータとして, それらの遠視野像を計算した。この結果から指向性を算出し, 空間的コヒーレンスと指向性の対応関係を導いたところ, 空間的コヒーレンスが良くなるにつれ, on-axis 型と off-axis 型の指向性に顕著な差が生じることが判明した。これは実験結果と非常に良く一致しており, off-axis 型でビームの指向性が良くなる現象は, 光パルスの形成そのものに起因しているのではなく, 近視野像に起因してい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.

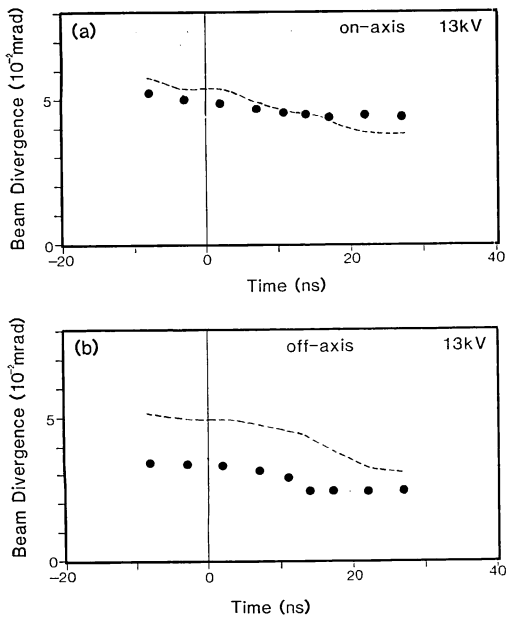


Fig. 10 The temporal change of the beam divergence estimated by the calculation result (Fig. 9 (c)) and the experimental result of spatial coherence (Fig. 4), (a) with on-axis type, (b) with off-axis type. Broken line is the experimental result of beam divergence.

- 2) A. E. Siegman: "Unstable optical resonators for laser applications," Proc. IEEE, **53** (1965) 277-287.
- 3) A. E. Siegman and H. Y. Miller: "Unstable optical resonator loss calculations using the prony method," Appl. Opt., **9** (1970) 2729-2736.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) D. W. Coutts, M. D. Ainsworth and J. A. Piper: "Sum frequency mixing of copper vapor output in KDP and β -BBO," IEEE J. Quantum Electron., **QE-25** (1989) 1985-1987.
- 7) 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.
- 8) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics* (MacMillan, New York, 1964) p. 260.
- 9) M. V. R. K. Murty: "Modification of Michelson interferometer using only one cube-corner prism," J. Opt. Soc. Am., **50** (1960) 83-84.
- 10) A. R. Ganesan, D. K. Sharma and M. P. Kothiyal: "Universal digital speckle shearing interferometer," Appl. Opt., **27** (1988) 4731-4734.
- 11) T. Omatsu, K. Kuroda, T. Shimura, M. Chihara, M. Itoh and I. Ogura: "Measurement of spatial coherence of a copper vapour laser beam using a reversal shear interferometer," Opt. Quantum Electron., **23** (1991) 477-484.
- 12) A. E. Siegman: "Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam," IEEE J. Quantum Electron., **QE-27** (1991) 1146-1148.