

Optical Coherence Tomography用合成光源の基礎研究

佐藤 学*, 若木 一郎*, 漆山 慶一*, 渡部 裕輝*, 丹野 直弘**

*山形大学大学院 理工学研究科 生体センシング機能工学専攻(〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16)

**科学技術振興事業団 山形県地域結集型共同研究事業(〒990-2473 山形市松栄 2-2-1)

Basic Study on Synthesized Light Source for Optical Coherence Tomography

Manabu SATO*, Ichiro WAKAKI*, Keiichi URUSHIYAMA*, Yuuki WATANABE*, and Naohiro TANNO **

*Graduate Program of Human Sensing and Functional Sensor Engineering, Graduate School of Science and Engineering,
Yamagata University Yonezawa, Yamagata 992-8510**Japan Science and Technology Corporation, Regional Joint Research Project of Yamagata Prefecture
2-2-1 Shouei, Yamagata 990-2473

(Received April 10, 2003)

We have studied on the light intensity ratio of synthesized light source (SLS) for the improvement of spatial resolution of optical coherence tomography (OCT). SLS consists of two LEDs with wavelength 691 nm, spectral width 99 nm and 882 nm, 76 nm. The small imaging interferometer also consists of plan-convex lens of focal length 6 mm and diameter 6 mm, beam splitter and reference mirror with PZT. The axial resolution was measured at 1.2 μm with the side lobe intensity 42 % on the condition of intensity ratio of 1 : 0.5. The irradiated power was 18 μW . This axial resolution was 57 % compared to the axial resolution using a single LED. The image of test pattern was measured using the phase shift method and two lines with the interval of 9.8 μm were clearly measured. The lateral resolution was calculated at 1.1 μm from wavelength and numerical aperture.

Key Words: Optical coherence tomography, Spatial resolution, Synthesized light source

1. はじめに

近年, 生体組織の断層画像測定法として, 数 μm から数10 μm の高い空間分解能と微弱な近赤外光を用いることにより生体に無害という特徴から, OCT (Optical Coherence Tomography) が活発に研究されている^{1,2)}. すでに眼科臨床では実用化されており, 消化器系・循環器系などに向けて幅広い臨床応用が研究されている³⁾. OCTは, 低コヒーレンス干渉計をベースとしており, 生体組織に垂直に光を照射して, 組織内部からの後方散乱光の強度プロファイルを測定し, 照射光の光軸に対して横方向に逐次測定を繰り返すことにより断層画像を測定するものである. 光軸方向の空間分解能は, コヒーレンス長の半分, 横方向の空間分解能は照射ビーム径で与えられる⁴⁾.

空間分解能の向上は, OCTの重要なテーマの一つであり, 光源としては低い時間的コヒーレンスと高い空間的コヒーレンスが求められる. 光源として一般には汎用性からSLD (Superluminescent Diode) やLED (Light Emitting Diode) が用いられており, 中心波長が約0.8 μm で, SLDではコヒーレンス長が10~43 μm , LEDでは約10 μm である. 高空間分解能に向けては種々の光源の報告がある.

まず, カーレンズ モードロック・チタンサファイアレーザー (Kerr-lens mode-locked Ti-sapphire laser : KLM Ti:S Laser) を用いて, 中心波長0.8 μm で1.5 μm の光軸方向分解能と3 μm の横方向分解能が実現されている⁵⁾. また, KLM Ti:S Laserとフォトニッククリスタルファイバーの分散特性を利用してスペクトルを広げ, 中心波長1.1 μm で1.3 μm の光軸方向分解能と4 μm の横方向分解能も報告されている⁶⁾.

一方, 広いスペクトルと簡便さから熱光源の応用も早くから検討され⁷⁾, ファイバ干渉系でのヘテロダインビート信号の安定性⁸⁾や, SLDやLEDとの空間分解能の定量的な比較⁹⁾, さらにはLinnik型二次元干渉系と二次元ロックイン検出法を組み合わせた約1 μm の空間分解能¹⁰⁾も実現されている. しかし, 現在ではTi:S Laserシステムは, 高額・操作・維持などの点で, 実用化・汎用性に問題がある. また, 熱光源は安定性・効率などに問題があると考えられる.

一方, 複数の光源の合成が, 空間分解能の向上に有効であることはすでに報告されている¹¹⁾. 我々は, 複数の半導体発光素子からなる合成光源が, 高空間分解能・分解能の可制御性・低価格・高効率などの特徴を有すると

考え、各光源の強度制御に着目し、コヒーレンス関数のメインピーク幅を減少させ、同時に画像のゴーストの原因ともなるサイドローブの抑制を行うための設計手法を理論的・実験的に検討してきた¹²⁻¹⁴⁾。一方、光軸方向走査などの機能化を有する合成光源の研究も報告されている^{15,16)}。

本論文では、中心波長0.7 μm と0.9 μm の2つのLEDで合成光源を構成し、小型の二次元マイケルソン干渉光学系を用いて、コヒーレンス関数の測定により実験的に強度比の検討を行い、さらに試料にテストパターンを用いて行った横方向の空間分解能評価等について述べる。

2. 実験光学系

実験光学系はFig. 1に示されるように、合成光源(a)と二次元干渉光学系(b)から構成される。光源はLED1 (Sharp, GL5PR40)とLED2 (浜松フォトニクス, L1915)である。LED1とLED2からの光は、スライドガラスにAlを蒸着した反射率42%のハーフミラーで合波され、合成光波となる。光の利用効率を上げるためにハーフミラーと各LEDは数ミリ以内に近接させた。LED1の出力パワーは、注入電流100 mAで8 mWであり、LED2では、50 mAで0.2 mWであった。

干渉光学系は、二次元マイケルソン干渉計である。平凸レンズ($f=6\text{ mm}$, $6\text{ mm } \phi$)を接着させた無偏光ビームスプリッター(BS, 6 mm 角)に対して、PZT付き参照ミラー(RM)とサンプルとしてミラーまたはテストパターンをFig. 1のように配置した。BSとミラーとの距離は2.8 mm、BSとLED1との距離は12 mmである。

コヒーレンス関数の測定は、結像位置にPD (Newfocus, 2001)への光ファイバー端面を配して、マイクロモーターとピエゾステージでRMを動かし、光路差を走査した際のPDの出力信号を測定した。画像測定は、3枚の画像を用いる位相シフト法を用いた。結像位置にCCDカメラ(浜松ホ

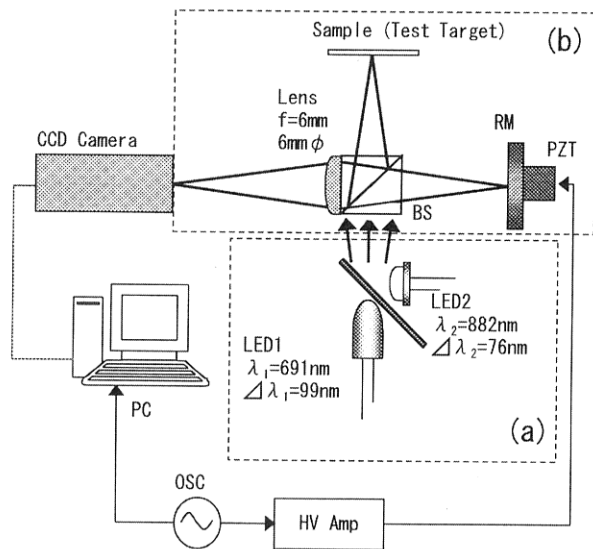


Fig. 1 Experimental setup. (a) Synthesized light source with two LEDs. (b) Two-dimensional interferometer.

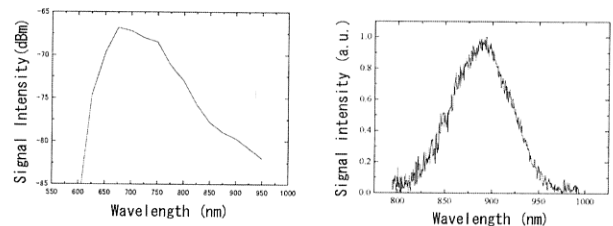
トニクス, C4880-80)の撮像面を合わせ、カメラからの画像信号は、PCに取り込ませた。発振器からの信号でPZTによる位相シフトと画像取得が行われ、画像処理により画像が得られた。画素数は、656(H) \times 494(V)である。

3. 測定結果と検討

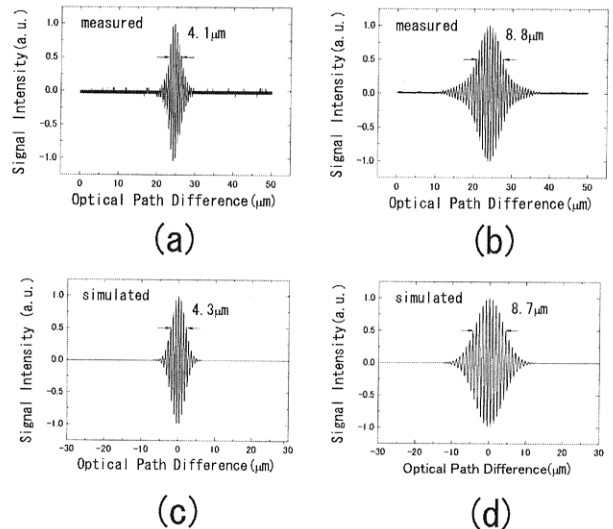
3.1 光源の基礎特性

測定したLED1,2のスペクトルをFig. 2(a), (b)に示す。LED1の中心波長は691 nm, スペクトル幅は99 nm (半値全幅), LED2では中心波長882 nm, スペクトル幅76 nmである。LED1のスペクトル形状は長波長側にテールを引く形となっているが、スペクトル形状をほぼガウス型と仮定すると、コヒーレンス長はそれぞれ4.2 μm , 9.0 μm と計算される。

次に測定したLED1, 2のコヒーレンス関数をFig. 3 (a), (b)に、スペクトル測定から得られた中心波長, スペクトル幅を用いたシミュレーション結果をFig. 3 (c), (d)に示す¹²⁾。コヒーレンス長の測定値は、LED1の場合4.1 μm , LED2の場合8.8 μm と得られ、ガウス型のスペクトル形状を仮定したシミュレーションよりそれぞれ4.3 μm , 8.7 μm と得られた。コヒーレンス長は、測定したコヒーレンス関数から数値処理でエンベロープを求め、その半値全幅の値である。計算結果, 測定結果, シミュレーション結



(a) (b)
Fig. 2 Optical spectra of LED1 and LED2.



(a) (b) (c) (d)
Fig. 3 Coherence functions (CFs). (a) Measured CF of LED1. (b) Measured CF of LED2. (c) Simulated CF of LED1. (d) Simulated CF of LED2.

果はよく対応しているのがわかる。コヒーレンス形状が測定結果とシミュレーション結果とで僅かに異なるのは、スペクトル形状が理想的なガウス型でないことによると考えられる。

3.2 合成光源のコヒーレンス関数

合成光源のコヒーレンス関数は、次式で与えられる¹²⁾。

$$R_s(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N I_i} \sum_{i=1}^N I_i \exp\left[-\left(2\sqrt{\ln 2}x/L_{Ci}\right)^2\right] \cos(2\pi x/\lambda_i) \quad (1)$$

ここで、 N , x は各光源の数、光路長差であり、 I_i , L_{Ci} , λ_i は各光源強度、コヒーレンス長、中心波長である。また、各光源のコヒーレンス長 L_c は

$$L_c = \frac{4 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

で与えられ、 $\Delta\lambda$ はスペクトル幅(半値全幅)である。また、コヒーレンス関数のエンベロップを表す関数を次式と求めた。

$$R_{ENV}(x) = \left| \frac{1}{\sum_{i=1}^N I_i} \sum_{i=1}^N I_i \exp\left[-\left(2\sqrt{\ln 2}x/L_{Ci}\right)^2\right] \exp(j2\pi x/\lambda_i) \right| \quad (3)$$

合成光源の強度比とそのコヒーレンス関数との関係を実験的に検討するためにLED1, 2の強度比を1:1から1:0まで0.1ステップで変えてコヒーレンス関数の測定を行った。強度比の設定はLED1のパワーを最大に固定して、

LED2のパワーをPDでモニターし、注入電流を制御した。サンプルにはAl蒸着ミラーを用いた。

測定したコヒーレンス関数の一部をFig. 4 (a), (b)に、また式(1)によるシミュレーション結果をFig. 4 (c), (d)に示す。両者の比較よりベース部が若干異なるが、シミュレーション結果は測定結果にほぼ一致していることがわかる。また、コヒーレンス関数の測定結果の一部をFig. 5 (a)-(f)に示した。測定パラメータを用いた式(3)によるエンベロップのシミュレーション結果をFig. 5に重ねて示した。Fig. 5より、測定した合成光源のコヒーレンス関数は、ほぼシミュレーション結果に一致しており、この式

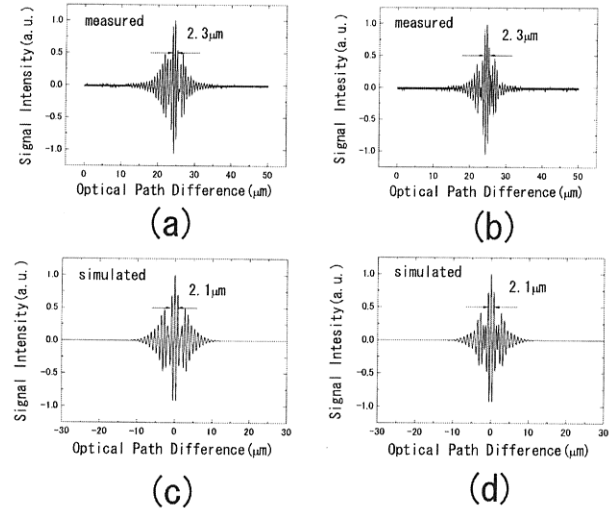


Fig. 4 Coherence functions (CFs) of synthesized light source (SLS). (a) Measured CF of SLS with LED1:LED2=1:1. (b) Measured CF of SLS with LED1:LED2=1:0.5. (c) Simulated CF of SLS with LED1:LED2=1:1. (d) Simulated CF of SLS with LED1:LED2=1:0.5.

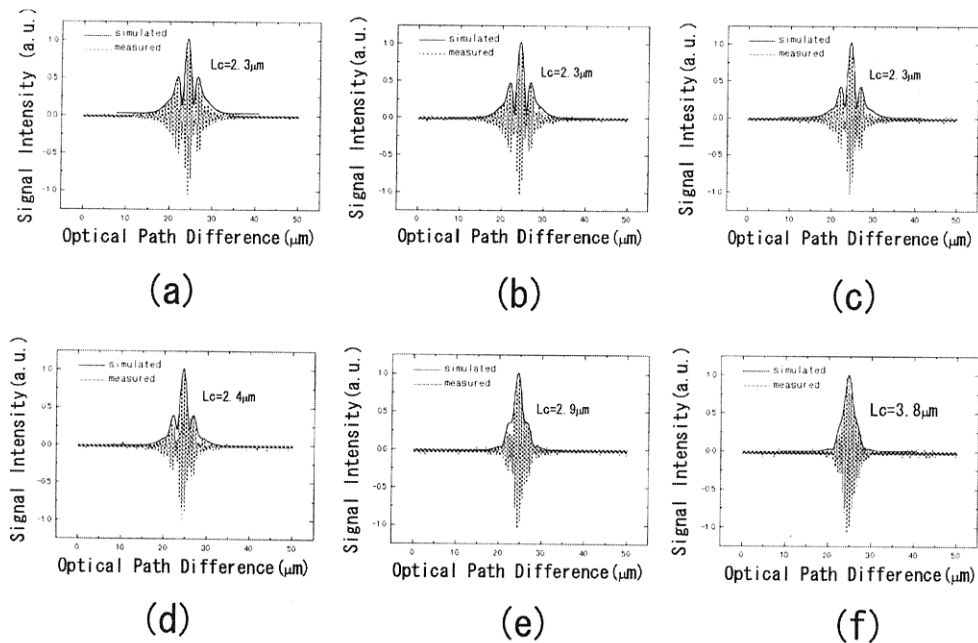


Fig. 5 Coherence functions of synthesized light source with the different intensity ratio. (a) LED1:LED2=1:1. (b) 1:0.8. (c) 1:0.5. (d) 1:0.4. (e) 1:0.2. (f) 1:0.1.

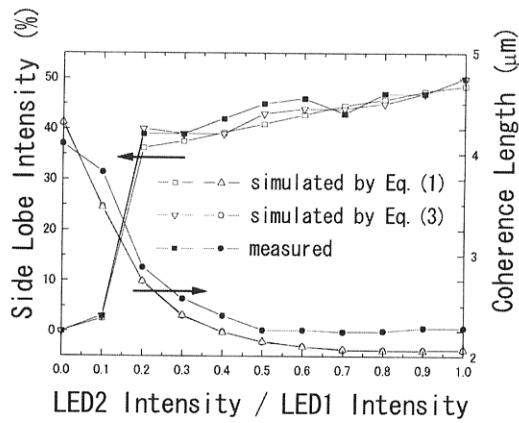


Fig. 6 Dependences of coherence length of synthesized light source and side lobe intensity on intensity ratio of LED1 and LED2.

の妥当性がわかる。この式(3)は、合成光源の設計・最適化に有用である。

コヒーレンス長とサイドローブ強度の強度比依存性を Fig. 6 に示す。サイドローブ強度は、光路長差がゼロのときの強度で規格化して示してあり、測定値結果、式(1)と式(3)を用いて得られた結果を合わせて示した。全体的に、LED1とLED2の強度比が等しくなると、メインピークの幅、つまりコヒーレンス長が短くなるが、サイドローブの高さが増大する傾向がある。LED2の強度比が1から0.5に変化した場合、コヒーレンス長はほぼ2.3 μmで、サイドローブの高さは最大値の52%から42%に減少する。さらにLED2の比率が減少するとサイドローブが減少し、コヒーレンス長が増加する傾向がある。よって、実験的にLED1、LED2の強度比として1:0.5を選択した。このときサイドローブ強度は42%で、コヒーレンス長は2.3 μmである。以後、この条件で実験を行った。合成光源を用いたサンプル照射パワーは、パワーメーターの面積196 mm²で18 μWである。

3.3 空間分解能評価

光軸方向分解能がコヒーレンス長の半分で与えられるので、強度比がLED1:LED2 = 1:0.5の場合、サイドローブ強度は42%であるが、コヒーレンス長が2.3 μmと測定されたので、光軸方向分解能は1.2 μmとなる。LED1のみの光軸方向分解能は2.1 μmであるので、合成光源とすることにより光軸方向分解能が57%に減少した。

一方、横方向分解能を評価するためにサンプルにテストパターン(Edmund, U.S.A.F.ボジ型)を用い、CCDカメラをセットして画像測定を行った。位相シフト法を用いて測定した画像をFig. 7に示す。Fig. 7(a)は、LED2のみを使用した場合の測定画像であり、Fig. 7(b)は合成光源で測定した画像である。ピッチの異なるパターンが明瞭に測定されているのがわかる。A、B間での信号強度プロファイルをFig. 8(a)、(b)に示した。Rayleighの分解能の定義では、近接する2つの像点があるとき、強度の中央極小値が両側の極大値に対して74%の場合、識別可能としている。Fig. 7で数値を示した部分は、幅4.9 μm、間隔

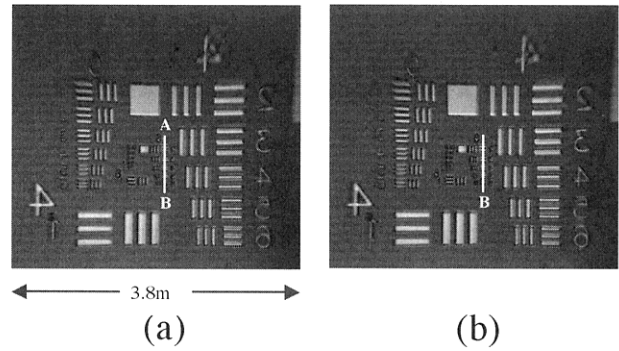


Fig. 7 Measured images of test pattern using the phase shifting method. (a) With only LED2. (b) With synthesized light source with the intensity ratio of 1:0.5.

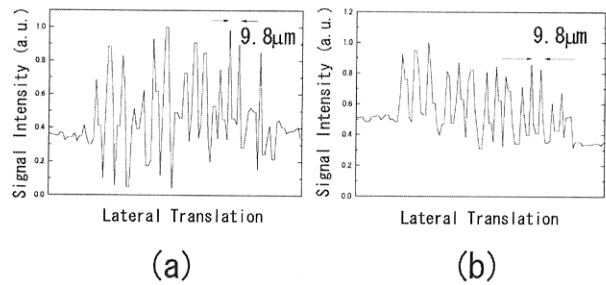


Fig. 8 Intensity profiles between A and B in Fig. 7. (a) With only LED2. (b) With synthesized light source in the same condition as Fig. 7(b).

9.8 μmの3つのパターンに対応するプロファイルであり、Fig. 7(a)では谷の部分はピーク値の50%であり、Fig. 7(b)では47%である。これより、LED2、合成光源いずれの場合でも横方向分解能は9.8 μm以下であることが確認された。

設計では、Fig. 1においてテストパターンとBS間距離が2.8 mm、レンズ直径が6 mmであるので、BSによる光線の屈折とレンズの大きさを考慮して、実効開口数NAは0.44と求められる。このとき、光学系の横方向分解能をレンズで得られるスポット径(0.52×波長/NA)とすると、波長691 nmの場合、0.83 μm、波長882 nmの場合は1.1 μmと求まる。しかし、実際には、実効開口数の減少や収差などが原因で横方向分解能の劣化が生じると考えられる。

4. おわりに

OCTの高空間分解能用光源を目的に、2つのLEDで合成光源を構成し、二次元マイケルソン干渉光学系を用いて光軸方向分解能と各光源の強度比との関係を実験的に検討し、試料にテストパターンを用いて横方向分解能の評価を行った。

中心波長691 nm、スペクトル幅99 nmのLEDと中心波長882 nm、スペクトル幅76 nmのLEDから構成された合成光源を用いて、試料照射パワー18 μWで強度比が1:0.5の場合、サイドローブ強度42%においてコヒーレンス長2.3 μmが得られた。これは、1.2 μmの光軸方向分解能に対応し、この値はLED単体の57%である。また、横方向分解能はテストパターンを用いて9.8 μm以下であることが確認さ

れ、計算値では1.1 μm と得られた。

今後の課題としては、空間分解能とサイドローブ強度がトレードオフの関係にあるので、サイドローブの測定画像へ及ぼす影響を検討する必要がある。また、拡がりのある複数の低コヒーレンス光源を有する二次元干渉光学系の理論解析が重要である。これにより光学系全体の設計が可能となり、合成光源の照射パワーの有効利用も含めた全体の最適化を行うことができる。さらに合成光源の各半導体発光素子の高出力化も必要である。

謝 辞

本研究の一部は、NEDOからの委託研究「光干渉利用高機能断層画像測定システム」で行われていますので、ここに謝意を表します。

参考文献

1) D. Haug, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto: *Science* **254** (1991) 1178.

2) 佐藤, 丹野: 計測と制御 **39** (2000) 259.
3) M. Brezinski and J. G. Fujimoto: *OSA Optics & Photonics News* **13** (2002) 34.
4) B. E. Bouma and G. J. Tearney, eds.: *Handbook of Optical Coherence Tomography* (Marcel Dekker, Inc., New York, 2002).
5) W. Drexler, U. Morgener, F. X. Kartener, C. Pitris, S. A. Boppart, X. D. Li, E. P. Ippen, and J. G. Fujimoto: *Opt. Lett.* **24** (1999) 1221.
6) Y. Wang, Y. Zhao, J. S. Nelson, Z. Chen, and R. S. Windeler: *Opt. Lett.* **28** (2003) 182.
7) A. F. Fercher, C. K. Hitzenberger, M. Sticker, E. Moreno-Barriuso, R. Leitgeb, W. Drexler, and H. Sattmann: *Opt. Commun.* **185** (2000) 57.
8) M. Sato and N. Tanno: *Appl. Opt.* **41** (2002) 2461.
9) M. Ohmi and M. Haruna: *Proceedings of Asian Symposium on Biomedical Optics and Photomedicine*, Sapporo (2002) 116.
10) L. Vabre, A. Dubois, and A. C. Boccara: *Opt. Lett.* **27** (2002) 530.
11) J. M. Schmitt, S. L. Lee, and K. M. Yung: *Opt. Commun.* **142** (1997) 203.
12) Y. Zhang, M. Sato, and N. Tanno: *Opt. Lett.* **26** (2001) 205.
13) Y. Zhang, M. Sato, and N. Tanno: *Opt. Commun.* **192** (2001) 183.
14) 漆山, 張, 佐藤, 丹野: レーザー学会第289回研究会報告 (2001)RTM-01-14.
15) Z. He and K. Hotate: *Opt. Lett.* **24** (1999) 1502.
16) W. Wang, H. Kozaki, J. Rosen, and M. Takeda: *Appl. Opt.* **41** (2002) 1962.