二次元微小共振器レーザーにおける空間モードの選択励起

福島 丈浩¹, 砂田 哲²

¹岡山県立大学 情報工学部情報通信工学科 (〒719-1197 岡山県総社市窪木111)

²金沢大学 理工研究域機械工学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町ヌ7番地)

Selective Excitation of Spatial Modes in Two-Dimensional Microcavity Lasers

Takehiro FUKUSHIMA¹ and Satoshi SUNADA²

¹Department of Information and Communication Engineering, Okayama Prefectural University, 111 Kuboki, Soja, Okayama 719-1197

²Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Science and Engineering, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192

(Received February 13, 2015)

Advances in fabrication technologies have allowed the fabrication of laser cavities with arbitrary 2-D shapes. 2-D cavities have a wide variety of spatial modes, which have different wavefunctions. From the viewpoints of both fundamental physics and practical applications, it is important to selectively excite one desired mode from among many spatial modes. In this paper, we review the methods of selective mode excitation for 2-D microcavity laser diodes based on the control of both cavity shape and electrode contact pattern. We also review two major applications of the selective excitation technique to fundamental research in both quantum and laser chaos. One is the observation of chaos-assisted tunneling, and the other is compact chaotic laser devices that consist of a 2-D microcavity laser and an external feedback cavity. Finally we refer to the potential applications of the selective excitation technique to such functional optical devices as beam-switching devices and polarization-switching devices.

Key Words: Two-dimensional cavity, Microcavity laser, Selective excitation, Spatial mode

1. はじめに

共振器に閉じ込められた光線の振舞は、共振器の形状に大きく依存する。例えば、円盤形の共振器では、光線は同じ入射角を保ったまま端面で反射を繰り返す。また、2つの曲面ミラーを対向させたファブリー・ペロー型の安定共振器では、共振器の軸に沿った周期軌道が幾何学的に安定になるように共振器が設計される¹⁾。これらの共振器は古くから研究が行われており、光線の振舞を反映した共振器モードが形成されることが知られている。円盤形の共振器では共振器の端に光が局在するウィスパーリングギャラリモードが現れ、安定共振器条件のファブリー・ペロー型共振器ではエルミート・ガウスモードが現れることが知られている^{1,2)}。しかし、周りが閉じた二次元微小共振器では、このような軌道のみならず、しばしば不規則な振舞を示す軌道が現れる。このようなカオス的な軌道を有する共振器(カオス共振器)において、光線軌道とモード(波動)には単純な対応関係が成り立たないことが知られており、そのような共振器でレーザーを発振させた場合に得られる発振モードを調べることは、興味深い研究課題である^{3,4)}。

現在までに様々な形状の二次元微小共振器レーザーが活発に研究されてきたが、比較的早期の研究として、たとえば、1998年のベル研究所Capasso教授とイエール大学Stone教授の共同研究グループによる蝶ネクタイレーザーが有名である⁵⁾。この研究では、共振器の形状を円盤形から少しずつ歪ませた複数の量子カスケードレーザーを製作して発振モードを系統的に調べている。その結果、共振器パラメータを適切に選ぶと、従来両立することが困難であった高いQ値と指向性を同時に有するモードを励起できることを示し、注目を集めた。

同じ頃、スタンフォード大学Siegman教授の研究グループは、ファブリー・ペロー型共振器の片方の端面ミラーを曲面ミラーとし、さらに側面ミラーを設けた不安定共振器条件の擬似スタジアム型GaAs半導体レーザーを製作して、光線軌道と発振モードの関係を調べた⁶⁻⁸⁾。この研究では、不安定な周期軌道に光が局在する特殊なモードが現れることを実験と理論の両面から明らかにしている。

本論文では、筆者らによる擬似スタジアム型半導体レーザーに関する研究の展開として、安定共振器条件の擬似スタジアム型半導体レーザーにおいて特定の安定周

期軌道に対応する空間モードを選択的に励起する方法を紹介する。導波路を用いた一次元的な共振器と異なり、面内に光を閉じ込める二次元共振器には多彩な空間モードが現れる。これらのモードの中から所望のモードを選択的に励起する技術は、学術的な観点のみならず応用の観点から見ても重要である。さらに、本方法をカオスの研究に応用した例を紹介するとともに、ビームスイッチ素子や偏光スイッチ素子をはじめとする光機能デバイスへの応用の可能性について述べる。

2. 空間モードの選択励起

レーザーは、発振に寄与するモードに対して損失を補うだけの利得を与えることで発振に至る¹⁾。二次元微小共振器に現れる複数の空間モードの中から、特定のモードを選択的に励起するには、所望のモード以外の空間モードの損失が大きくなるように設計するか、所望のモードに対する利得を他の空間モードより高く設計する必要がある。

例えば、Fig. 1に示すように二つの曲面ミラーを二つの側面ミラーで繋いだ擬スタジアム型共振器には、軸に沿った周期軌道、菱形の周期軌道、側面ミラーで複数回反射を繰り返す菱形周期軌道、そして、カオス軌道が存在する。このように比較的単純な形状であっても二次元共振器には多彩な光線軌道が現れる。ここでは、Fig. 1 (a)と(b)に示した軸軌道と菱形軌道に対応する空間モードをそれぞれ選択的に励起する方法を紹介する⁹⁻¹¹⁾。

まず、側面ミラーで複数回反射する周期軌道(Fig. 1 (c))やカオス軌道(Fig. 1 (d))に対応する空間モードを除去するためにFig. 2に示すように共振器の四隅が開いた形状を採用する。四隅に光吸収領域を設ければ、ここに入射した光線軌道は発振に寄与しなくなる。

次に、軸軌道と菱形軌道に対応するモードが形成されるためには、共振器長 L と曲面ミラーの曲率半径 R が安定共振器条件($L \leq 2R$)を満足するように設計する必要がある^{1,12)}。それぞれのモードの波動関数の空間分布は、拡張Fox-Liモード計算法と呼ばれる反復計算法を用いることで求めることが可能である¹²⁾。計算で得られた空間分布に合わせて電極コンタクト領域を形成して電流を注入すれば、所望のモードに高い利得を与えることが可能になる。

Fig. 3は、それぞれ軸軌道モードと菱形軌道モードの空間分布に合わせて電極を形成したGaAs微小共振器レーザーの放射パターン(遠視野像)を測定した結果を示している⁹⁾。軸に沿って電極を設けたレーザーでは、軸方向にビームが出力され、菱形の電極を設けたレーザーでは、菱形の周期軌道に対応する出射方向($\pm 19^\circ$ の方向)にビームが出力されている。しかしながら、ビームの形状を見ると複数のピークが現れていることがわかる。軸軌道モードと菱形軌道モードには、横方向の光強度分布に単一のピークを持つ最低次モードの他に、複数のピークを持つ高次モードが存在する¹²⁾。Fig. 3に示し

Fig. 1 Ray trajectories confined in a quasi-stadium cavity, (a) axial trajectory, (b) diamond-shaped trajectory, (c) diamond-shaped trajectory with multiple reflections at the sidewall mirrors, (d) chaotic ray trajectory.

Fig. 2 Quasi-stadium open cavity with absorption regions (gray regions).

Fig. 3 Far field emission patterns of quasi-stadium laser diodes with an electrode contact pattern corresponding to (a) axial mode pattern and (b) diamond-shaped mode pattern.

た複数のピークは、最低次モードと高次モードが同時に発振したことによって生じたと解釈されている⁹⁾。

次に、高次モードの発振を抑えて最低次モードの発振を得る方法について述べる。モードの次数が高くなる程、周期軌道に沿って伝搬するビームの幅が広がる。したがって、電極コンタクトの幅を狭くして電流の拡がりを抑えれば、高次モードの利得を抑えることが可能になる¹⁰⁾。Fig. 4は、電極幅を $2\mu\text{m}$ まで狭くしたときの放射パターンを示している。高次モードの発振が抑制され、単峰性の出力ビームが得られている。

高次モードの発振を抑えるもう一つの有効な方法とし

Fig. 4 Far field emission patterns of quasi-stadium laser diodes with a narrow (2- μm width) electrode contact pattern corresponding to (a) axial mode pattern and (b) diamond-shaped mode pattern.

Fig. 5 (a) Schematic diagram of a quasi-stadium laser diode having narrow curved end mirrors and (b) far field emission patterns.

て、曲面ミラーの幅を狭くする方法が考えられる¹¹⁾。曲面ミラーの幅を狭くすると、ビームの幅が広い高次モードは最低次モードに比べて大きな損失を受ける。Fig. 5は、菱形の電極を設けた擬似スタジアム型レーザーにおいて、曲面ミラーの幅を20 μm まで狭くした素子の構造と放射パターンを示している。光出力20 mWまで高次モードの発振が抑えられ、単峰性の出力ビームが得られている。

このように安定周期軌道に対応した空間モードについては、共振器や電極の形状を工夫することにより、選択的に励起することが可能である。一方、Fig. 1 (d)に示したカオス軌道に対応する空間モードについては、共振器全体に光が分布するため選択励起が困難である。カオス軌道に対応するモードを励起するには、スタジアム型共振器のように安定な周期軌道が存在しない共振器を用いることが有効である¹³⁾。

3. 量子カオス研究への応用

古典力学におけるカオス現象が量子力学の系にどのように刻印されるのかという問題を議論する物理学の一つの分野に量子カオスと呼ばれる分野がある¹⁴⁾。例えば、箱の中に閉じ込められた古典的な粒子の運動を考えると、粒子の軌道は箱の形に大きく依存する。粒子がカオス的な振舞を示すような箱において、古典的な粒子がとる軌道とシュレディンガー方程式を解いて得られる波動関数や固有値との関係を調べる研究が古くから行われている¹⁵⁾。ここで、箱を光共振器に、粒子の軌道を光線の

軌道に置き換えると、定常状態ではどちらも同じヘルムホルツ方程式で記述される。このような類似性から、量子カオスの分野で明らかにされた理論的な研究成果を光やマイクロ波の共振器で検証することが試みられている。本章では量子カオスの研究分野で興味を持たれているカオストンネル現象(Chaos Assisted Tunneling)を選択励起の技術を用いて検証した例を紹介する^{16,17)}。

カオストンネル現象を観測するために考案された共振器の形状と光線の軌道をFig. 6に示す。この共振器には、Fig. 6 (a)に示した四角形の周期軌道が存在する。この周期軌道は幾何学的に安定であり、光線が周期軌道から僅かに逸れたとしても図のように光線は周期軌道から離れることなく、四角形の軌道の周りを回り続ける。また、別の軌道として、Fig. 6 (b)に示したカオス軌道が存在する。四角形の周期軌道の周りを周回する光線とカオス軌道は独立であり、光伝搬を光線で考える限り、これらの軌道が結合することはない。しかし、波動の伝搬を考えた場合には、四角形の安定周期軌道の周りに局在した光のエネルギーの一部がカオス軌道に流れることが指摘されており、このような現象はカオストンネル現象と呼ばれている。

このようなトンネル現象は、四角形の周期軌道に対応する空間モードを選択的に励起して、光の放射パターンを観測することで確認できる。半導体で共振器を製作すると四角形の周期軌道に対応するモードは全反射で共振器の内部に閉じ込められる。トンネル現象が起これば、Fig. 6 (a)に示した矢印のように反射点から接線方向(水平軸に対して $\pm 45^\circ$ と $\pm 135^\circ$ の方向)に微弱なエバネッセント波の放射が起こると予想される。一方、トンネル現象が起これば、四角形の軌道に沿って伝搬するレーザー光の一部がカオス軌道へ結合することになる。この光は、共振器内部に広がり、全反射条件を破って方向性のある放射を引き起こすと予想される。その結果、全反射で高効率に光を閉じ込めつつも指向的な放射を伴う、一見すると矛盾したような発振モードが得られると考えられる。実際、四角形の軌道に対応する空間モードの波動関数を計算するとFig. 6 (b)に矢印で示すように水平軸に対して $\pm 90^\circ$ の方向にピークを持つ放射が生じることが示されている¹⁶⁾。

Fig. 7に製作した微小共振器レーザーの素子構造と放

Fig. 6 Ray trajectories in a two-dimensional microcavity designed for observing chaos assisted directional emission, (a) stable periodic rectangle trajectory, (b) chaotic trajectory.

射パターンの観測結果を示している。四角形の周期軌道に対応するモードに合わせて電極コンタクトが形成されている。電流を注入するとレーザー発振が起こり、光スペクトルに四角形軌道の軌道長に対応した等間隔のピークが観測される¹⁷⁾。このことから、四角形の軌道に対応した空間モードが選択的に励起されていることが確認できる。放射パターンには、Fig. 7 (b)に示すようにカオストンネル現象を表す $\pm 90^\circ$ のピークが観測されている¹⁶⁾。これは、抽象的な数値モデルに偏りがちな量子カオスの理論研究を実在する半導体レーザーによる実験に結び付けて理論予想を実証した数少ない例の一つである¹⁸⁾。

4. レーザーカオス信号生成素子への応用

レーザーカオスの研究分野では、半導体レーザーの出力光に遅延を与えて再び共振器に戻すことによって高速な不規則振動が現れることが古くから知られている¹⁹⁾。このような現象は、戻り光カオスと呼ばれており、過去30年間に渡って研究が行われている。近年、このような戻り光カオスを秘匿通信や物理乱数生成に応用する研究が行われている^{20,21)}。実用化の観点から、カオス信号生成素子の小型化が重要な課題になっており、半導体レーザーと外部共振器をモノリシックに製作した光集積デバイスが提案されている²²⁻²⁶⁾。本章では、カオス信号生成素子に空間モードの選択励起の技術を応用した例を紹介する。

カオス信号生成素子の小型化を目的として、分布帰還型レーザーと直線導波路をモノリシックに製作した戻り光カオス素子が提案されている^{22,23)}。しかしながら、広帯域のカオス信号を生成するには戻り光に十分な遅延を与える必要があり、素子長が約1 cmと長くなる問題があった。近年、半導体レーザーと外部共振器に二次元微小共振器を用いることで、素子サイズを1 mm × 1 mm以下に小型化したカオス生成素子が提案されている²⁴⁾。

Fig. 8はこのカオス生成素子の構造を示している。左側の擬スタジアム型レーザーは、曲面ミラーと平面ミラーで共振器が構成されており、軸軌道に対応する空間モードが選択的に励起されるように共振器のパラメータと電極形状を設計している。一方、右側の外部共振器にも曲面ミラーと平面ミラーで共振器が構成される擬スタジアム型共振器を採用している。レーザーから外部共振器に入射したビームが図に示した安定周期軌道に沿って伝搬して再びレーザーに帰還するように設計されている。外部共振器の長さは600 μm であるが、外部共振器に結合した光は共振器の中を6往復した後、レーザーに戻るため、軌道の長さは約7.2 mmとなる。このように二次元微小共振器の内部に光路を曲折げて配置することにより短い共振器で長い光路長が実現できる。

レーザーを発振させて、外部共振器の注入電流により戻り光量を上げていくと、レーザーの出力光強度は、時間に対して安定な状態から不安定な状態へと移行する。RFスペクトルを観測すると、外部共振器の注入電流が

Fig. 7 (a) Schematic diagram of chaos assisted emission two-dimensional microcavity laser and (b) far field emission pattern.

Fig. 8 Schematic diagram of a compact chaotic laser device with a two-dimensional external cavity.

ゼロの時は、緩和振動を表すブロードなピークが観測される。この状態から外部共振器の注入電流を上げて行くと、RFスペクトルに鋭いピークが現れる。さらに電流を上げると、ピークの強度が増加するとともに高調波のピークが現れる。さらに、注入電流を上げるとピークの幅が拡大して広帯域のカオス信号が観測される。このようなシナリオは、外部共振器長に対応する周波数が半導体レーザーの緩和振動周波数に比べて十分大きい場合に見られるシナリオと良く似ており²⁷⁾、理にかなった振舞である。

Fig. 8に示した素子の設計において、外部共振器に結合した光は、端面で反射される度に共振器の外部に漏れ出す。そのため、フィードバックの効率という観点から見ると好ましい設計とは言えない。フィードバックの効率を改善する方法としてFig. 9に示す素子が提案されている^{25,26)}。この素子では、全反射を利用するために外部共振器の形状を円形に近づけ、入出力ポートを設けている。入力ポートの端面から共振器に入射した光は、全反射を繰り返しながら星形の軌道に沿って共振器の中を伝搬し、出力ポート端面に到達する。端面で反射した光が再び同じ経路を辿ってレーザーに帰還する。星形の光線軌道が幾何学的に安定になるように共振器の周辺には、わずかな凹凸が設けられている。これまで外部共振器の平均半径 r_0 が100 μm (往復軌道長3.72 mm) と150 μm (往復軌道長5.58 mm) の共振器において星形の軌道に沿って光が伝搬することが実験で確認されている^{25,26)}。

近年、外部共振器長と生成されるカオス信号の関係が

Fig. 9 Schematic diagram of an improved chaotic laser device with a two-dimensional external cavity.

詳しく調べられており、往復遅延距離が6 mm以上となる外部共振器で、物理乱数生成に適した平坦で広帯域なスペクトルを持つカオス信号が生成されることが報告されている²⁸⁾。共振器の設計を最適化することで光路長を延長することが今後の重要な課題である。

5. 光機能デバイスへの応用の可能性

二次元微小共振器の空間モードを選択的に励起する技術が確立されると、半導体レーザーに新しい機能を付加することが可能になる。例えば、Fig. 2に示した擬似スタジアム型共振器を有する微小共振器レーザーに軸軌道と菱形軌道に沿った2つの電極を設けることで、出力ビームのスイッチ動作が可能になることが示されている²⁹⁾。しかしながら、この実験では共振器内部に小さな光スポットが形成される共心型共振器条件($L=2R$)が用いられている。そのため、高出力動作においてビーム形状の劣化が観測されている。Fig. 5に示すように共焦点型共振器条件($L=R$)を用いた実験では、20 mWの光出力まで単峰性の出力ビームが維持されている。共振器と電極の形状を最適化することで、高出力動作に適したビームスイッチ素子が可能になると予想される。

また、量子井戸構造を用いたレーザーでは、光学遷移の選択則によりTEモードの利得がTMモードより高くなる。そのため、GaAs単一量子井戸構造を用いた二次元微小共振器レーザーは、通常、TEモードで発振する。擬似スタジアム型微小共振器レーザーの軸軌道モードもTEモードで発振することを確認している。最近、菱形軌道の端面入射角をブリュースター角にほぼ一致するように設計した微小共振器レーザーにおいて、TMモードの発振が得られることが報告されている³⁰⁾。これは、端面入射角をゼロから大きくすると、TEモードの反射率は、ブリュースター角に近づくにしたがって単調に減少するのに対して、TMモードでは逆に反射率が增大するため、TEモードのミラー損失がTMモードに比べて大きくなることが原因と考えられている。擬似スタジアム型共振器を用いたビームスイッチ素子において菱形軌道の端面入射角をブリュースター角に設定すれば、光の出射方向のみならず偏光モードのスイッチも可能になると考えられる。

二次元微小共振器の空間モードを利用したビームスイッチ素子や偏光スイッチ素子は、選択励起技術の応用例として大変興味深い。

6. まとめ

二次元微小共振器レーザーに現れる多彩な空間モードの中から特定のモードを選択的に励起する方法について解説するとともに、選択励起の技術を量子カオスやレーザーカオスの研究に応用した例を紹介した。更に、ビームスイッチ素子や偏光スイッチ素子を始めとする光機能デバイスへの応用の可能性について展望を述べた。空間モードの選択励起技術は、二次元微小共振器を利用した新しいデバイス応用の可能性を切り開く重要な技術であり、今後、応用を目指した研究が期待される。

謝 辞

二次元微小共振器レーザーの研究を共同で進めているNTTコミュニケーション科学基礎研究所の篠原 晋博士、新井 賢一博士、早稲田大学の原山 卓久教授に厚くお礼申し上げます。また、研究を進める上でお世話になった多くの方々に感謝致します。最後に、筆頭著者の福嶋は、二次元微小共振器レーザーの研究を始める機会をいただいたスタンフォード大学の故Siegman教授に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. E. Siegman: *Lasers* (University Science Books, California, 1986).
- 2) S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, and R. A. Logan: *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 289.
- 3) T. Harayama and S. Shinohara: *Laser & Photon. Rev.* **5** (2011) 247.
- 4) 福嶋 丈浩: 電子情報通信学会誌 **94** (2011) 323.
- 5) C. Gmachl, F. Capasso, E. E. Narimanov, J. U. Nöckel, A. D. Stone, J. Faist, D. L. Sivco, and A. Y. Cho: *Science* **280** (1998) 1556.
- 6) Y. Sun: Ph.D. thesis, Stanford University (1995).
- 7) T. Fukushima, S. A. Biellak, Y. Sun, C. G. Fanning, Y. Cheng, S. S. Wong, and A. E. Siegman: *CLEO 1997* (1997) CWF6.
- 8) T. Fukushima, S. A. Biellak, Y. Sun, and A. E. Siegman: *Opt. Express* **2** (1998) 21.
- 9) T. Fukushima, T. Harayama, T. Miyasaka, and P. O. Vaccaro: *J. Opt. Soc. Am. B* **21** (2004) 935.
- 10) T. Fukushima, S. Sunada, T. Harayama, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda: *Appl. Opt.* **51** (2012) 2515.
- 11) T. Fukushima, S. Shinohara, S. Sunada, T. Harayama, K. Arai, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda: *Opt. Lett.* **38** (2013) 4158.
- 12) T. Fukushima: *J. Lightwave Technol.* **18** (2000) 2208.
- 13) S. Shinohara, T. Fukushima, and T. Harayama: *Phys. Rev. A* **77** (2008) 033807.
- 14) 原山 卓久, 中村 勝弘: 量子カオス (倍風館, 2000).
- 15) M. C. Gutzwiller: *Chaos in classical and quantum mechanics* (Springer-Verlag, New York, 1990).
- 16) S. Shinohara, T. Harayama, T. Fukushima, M. Hentschel, T. Sasaki, and E. E. Narimanov: *Phys. Rev. Lett.* **104** (2010) 163902.
- 17) S. Shinohara, T. Harayama, T. Fukushima, M. Hentschel, S. Sunada, and E. E. Narimanov: *Phys. Rev. A* **83** (2011) 053837.
- 18) A. D. Stone: *Nature* **465** (2010) 696.
- 19) J. Ohtsubo: *Semiconductor lasers* (Springer Verlag, Berlin, 2006).
- 20) A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger, V. Annovazzi-Lodi, P. Colet, I.

- Fischer, J. García-Ojalvo, C. R. Mirasso, L. Pesquera, and K. A. Shore: *Nature* **438** (2005) 343.
- 21) A. Uchida, K. Amano, M. Inoue, K. Hirano, S. Naito, H. Someya, I. Oowada, T. Kurashige, M. Shiki, S. Yoshimori, *et al.*: *Nature Photon.* **2** (2008) 728.
 - 22) A. Argyris, M. Hamacher, K. E. Chlouverakis, A. Bogris, and D. Syvridis: *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 194101.
 - 23) T. Harayama, S. Sunada, K. Yoshimura, P. Davis, K. Tsuzuki, and A. Uchida: *Phys. Rev. A* **83** (2011) 031803.
 - 24) S. Sunada, T. Fukushima, S. Shinohara, T. Harayama, K. Arai, and M. Adachi: *Appl. Phys. Lett.* **104** (2014) 241105.
 - 25) S. Shinohara, S. Sunada, T. Fukushima, T. Harayama, K. Arai, K. Yoshimura: *Appl. Phys. Lett.* **105** (2014) 151111.
 - 26) T. Fukushima, S. Shinohara, S. Sunada, T. Harayama, K. Arai, K. Yoshimura, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda: *Frontiers in Optics 2014* (2014) JW3A.31.
 - 27) T. Heil, I. Fischer, W. Elsässer, B. Krauskopf, K. Green, and A. Gavrielides: *Phys. Rev. E* **67** (2003) 066214.
 - 28) R. Takahashi, Y. Akizawa, A. Uchida, T. Harayama, K. Tsuzuki, S. Sunada, K. Arai, K. Yoshimura, and P. Davis: *Opt. Express* **22** (2014) 11727.
 - 29) T. Fukushima and T. Harayama: *CLEO 2007* (2007) JWA127.
 - 30) T. Fukushima, S. Shinohara, S. Sunada, T. Harayama, K. Sakaguchi, and Y. Tokuda: *Opt. Express* **22** (2014) 11912.