

レーザーカオスを用いた安定な広帯域テラヘルツ波発生

栞 島 史 欣

Generation of Wide Range and Stable Terahertz Waves Using a Laser Chaos

Fumiyoshi KUWASHIMA

Generations of stable and wide-range terahertz (THz) waves are investigated from a photoconductive antenna excited using a chaotic oscillation laser, which is a multimode semiconductor laser with optical delayed feedback using an external mirror. The properties of the generated THz waves are compared with those of a case excited by a CW steady state laser. The THz wave above 0.5 THz is obtained from the multimode-laser diode excited photoconductive antenna using a laser chaos. A single mode optical fiber is also used for easy alignment.

Key words: laser chaos, multimode laser diode, optical delayed feedback, terahertz wave

テラヘルツ (THz) 波 ($\nu = 0.1 \sim 10$ [THz], $\lambda = 3 \sim 0.03$ [mm]) は電波的な物質透過性を有する最短波長領域であり, さまざまな応用が考えられている¹⁻³⁾が, 簡便な発生および検出器がなかったために「暗黒の電磁波帯」とよばれてきた. しかし, 1980年代末に高速繰り返しフェムト秒 (fs) レーザーを用いたテラヘルツ波の電磁波の発生および検出法が開発され, 1990年代に fs レーザーが発達したことにより, terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) が飛躍的に進化した⁴⁾. しかし, fs レーザーは数百万円以上と高価であり, 装置全体のコストを引き上げてしまう. また, fs レーザーはワンパルスごとの出力ゆらぎが数%以上あるため, 発生するテラヘルツ波の出力ゆらぎも数%以上生じる.

縦モード間の光ビートを利用し, 安価な市販の連続発振マルチモードレーザーダイオード (CW-MLD) を光伝導アンテナに照射することでテラヘルツ波の発生が行えるようになったが⁵⁾, 帯域, 安定性など後述する問題を残している. 筆者らはこの問題解決のため, 空間的コヒーレンスは元のレーザーと同等に保ったまま, スペクトルが拡大するレーザーカオス光を用いることを提案し, 研究を行って

いる.

単一モードレーザーでカオスを発生させる場合は, それが3変数以上の系であること, および bad cavity condition ($\kappa \geq \gamma_{\perp} + \gamma_{\parallel}$, Q の低い共振器の条件) を満たすことが鍵となってくる. ここで, κ は共振器中の光損失定数, γ_{\perp} は横緩和定数, γ_{\parallel} は縦緩和定数である. レーザーを bad cavity condition からの距離によって分類すると, class C ~ class A に分類できる⁶⁾.

Class B である半導体レーザーについては, これまで多くの研究が行われており, 文献⁷⁾にまとめられている. これまでの研究により, 一変数系である単一モード class A レーザーにおいても, 外部鏡による遅延帰還のみでカオス光が発生することが明らかとなった^{8,9)}. カオス発生には光学的遅延帰還を加えることが最も有効であるため, 本研究では光学的遅延帰還を利用している. レーザーカオス光による光のゆらぎとは, 非線形系における初期値鋭敏性により誤差が指数関数的に広がることにより将来が予測不可能になる現象であり, 決定論的な系で発生するマクロなゆらぎである.

1. レーザーカオス光によるテラヘルツ波発生のメカニズムとその特徴

マルチモードレーザーは、連続 (continuous wave: CW) 発振でも、縦モード間 (50 GHz 間隔程度) のビートおよびモード競合等により、強度がサブピコ秒オーダーでランダムにゆらいている。このレーザー光を光伝導アンテナに照射することで、光伝導アンテナ中のキャリア密度が変化し、アンテナ中で電流がサブピコオーダーで変化し、サブテラヘルツ波が発生する。検出用光伝導アンテナについては、励起光を分割し、時間遅延を加えたレーザー光とテラヘルツ波の相互相関を光伝導アンテナでとり、時間波形を観測している。励起光が完全にランダムで白色雑音的であれば、検出器からの出力はパルスで励起したものと同等になる。すなわち、単にフェムト秒レーザーを安価な多モード半導体レーザーに置き換えるだけで、分光システムが構築できる¹⁰⁾。実際には、励起光は完全に白色雑音的ではないため、波形が歪む。詳細は文献¹⁰⁻¹²⁾に示されている。しかし、このシステムは縦モード間のビートを利用するために、主として線スペクトルとなり、発生するテラヘルツも 0.5 THz¹³⁾以下と帯域が狭くなっている。シングルモードファイバーまたは空間フィルターにより横モードを選択することで、一見連続スペクトルは得られているものの、詳細に観測すれば線スペクトルの集合である可能性もある。さらに、シングルモードファイバーまたは空間フィルターを通すので、レーザー光出力が減少する^{13,14)}。

一方、各モードの波面が揃っているシングル横モードに近いレーザーを用いた場合、縦モードも2~3モードとシングルに近いものが多く、半導体レーザーのモードホップによりモード間の関係が変化するため、安定性にも欠ける。フェムト秒レーザーを用いた場合でも、パルスの繰り返し周波数に起因する80 MHz程度間隔で線スペクトルとなっているが、これを観測するには3 m程度の遅延機構が必要となるため、見かけ上連続スペクトルとなっている。

筆者らは、安価で帯域の広いテラヘルツ光源を得るために、励起光光源をカオスレーザーにすることを提案した¹²⁾。カオス光は通常のレーザー光に比べ、空間的コヒーレンスは保存されたまま、スペクトルが広いのが特徴である^{12,15)}。これまで自由空間でレーザー光を伝搬した場合、レーザー光をカオス光にすることで、レーザー光のスペクトル拡大、発生するテラヘルツ波の帯域拡大および線幅拡大^{12,16)}および安定化¹⁷⁾については報告を行った。しかし、空間伝搬をさせる場合においては、検出側の光伝導アンテナ側の光路で時間遅延を調整するリトロリフレクターのアライメントが困難である。CWレーザーの場合は

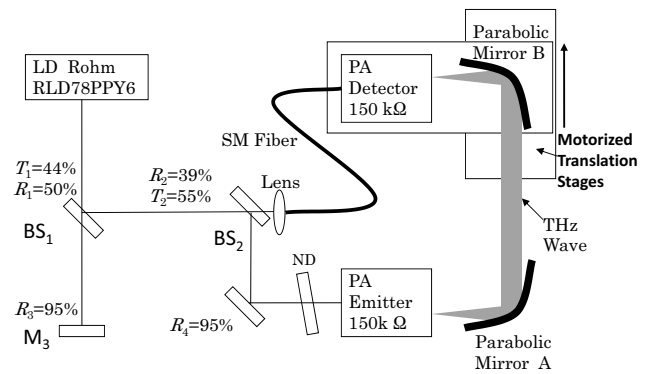


図1 光ファイバーを用いたテラヘルツ波発生の実験系。PA: 伝導アンテナ, BS: ビームスプリッター, PD: フォトダイオード。

移動距離全領域においてアライメントが合っている必要があるためである。一方、高出力レーザーとファイバーカップラーを用いた簡便な系を構成し、カオス光で帯域拡大も行ったが、戻り光量の制限、ファイバーカップラー導入によるレーザー出力の激減の問題があった¹⁸⁾。

今回はさらなるアライメントの簡便化および高効率化安定化を目指して、検出側のみ光ファイバーを用いた系を作製した上で、カオス光による帯域拡大を示す。

2. ファイバーを用いた実験

半導体レーザー (LD, Rohm, RLD78PPY6) からの出力は、ビームスプリッター1 (BS₁, 透過率 T₁) によってテラヘルツ発生側に分割された後、外部鏡 M₃ (反射率 R₃) により LD に戻されることで、光学的遅延帰還が LD に加わる。実効的な戻り光量は、

$$R_{3(\text{eff})} = T_1^2 R_3 \quad (1)$$

と表わされる。ここで、T₁はBS₁の透過率、R₃は外部鏡の反射率である。半導体レーザーの場合は、振幅で10⁻⁴、パワーで10⁻⁸オーダーのレーザー内部への戻り光でカオス発振が報告されている^{19,20)}。空間からレーザー内部への結合係数が一般に不明であるが、1%程度と仮定すると、パワーで10⁻⁶オーダーの戻り光でもカオス発振し得る。

BS₁により分岐されたレーザー光は、BS₂によりテラヘルツ電磁波発生用光伝導アンテナ (emitter) 側と、検出用光伝導アンテナ (detector) 側に分割される。アライメントの簡便化のため、検出器側へのレーザー照射はシングルモードファイバーを用いて行った (図1)。時間遅延は、光伝導アンテナ、放物面鏡、光ファイバーの出力側を一体としたものを移動させることで変化させた。ブロードエリア半導体レーザーを用いた実験では、3%程度しか光が導入できなかった^{13,14,18)}。しかし、レーザーカオスを用いて多モード化した場合は、元のレーザーと空間的なコヒー

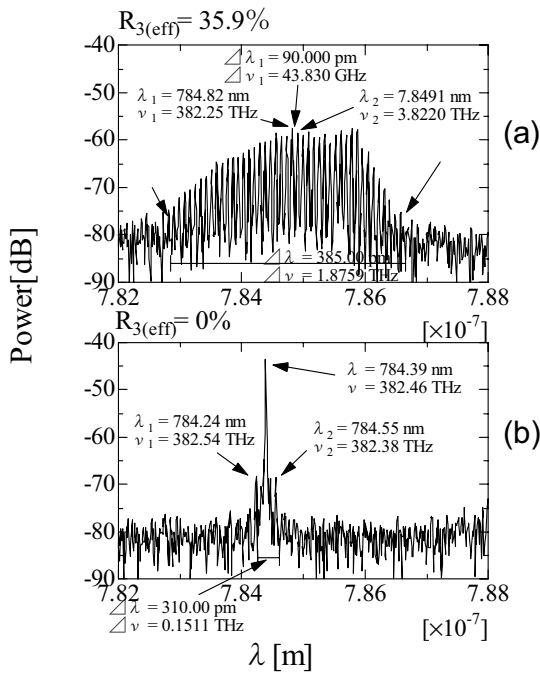


図2 光スペクトル. (a) $R_{3(\text{eff})} = 35.9\%$, (b) $R_{3(\text{eff})} = 0\%$.

レンズが変わらないため、50%程度のレーザー光をシングルモードファイバーに透過させることが可能となる。レーザーカオスは、空間的コヒーレンスの優れた縦多モードレーザーを実現するために有効な手法である。

レーザー光の光スペクトルを図2に示す。 $R_{3(\text{eff})} = 35.9\%$ の戻り光を加えカオス発振させた場合、ピーク値から -20 [dB]の地点で見て、光スペクトルが全体として $\Delta\nu = 1.8759$ [THz]であった。戻り光を加えない場合の $\Delta\nu = 0.1511$ [THz]に比べ、10倍程度に拡大している。

発生したテラヘルツ波の時系列を図3に示す。カオス光励起の場合は明確に信号が発生している(図3(a))のに対し、CWレーザー励起の場合はノイズの多い信号となっている(図3(b))。ただし、ノイズレベル(図3(c))と比較すれば、信号は発生している。

通常の半導体CWレーザーの場合、短時間はモードが安定するが、長時間ではモードホップが起き、安定しない。2モードを例にとると、交互にモードが発生する場合は、テラヘルツ波は発生しない。一方、同時に発生消滅を繰り返した場合は発生する。カオス光にした場合は、短時間ではモードホップが激しく発生し、光スペクトルは安定しないが、時間平均のスペクトルは安定している。また、多モード化することで、いずれかのモード間で光ビートが発生するため、テラヘルツは安定化する。

図4に図3のFFT (fast-Fourier-transform)を示す。 $R_{3(\text{eff})} = 35.9\%$ の戻り光を加えレーザーをカオス発振させた場合、テラヘルツ波の強度が強くなっている(図4

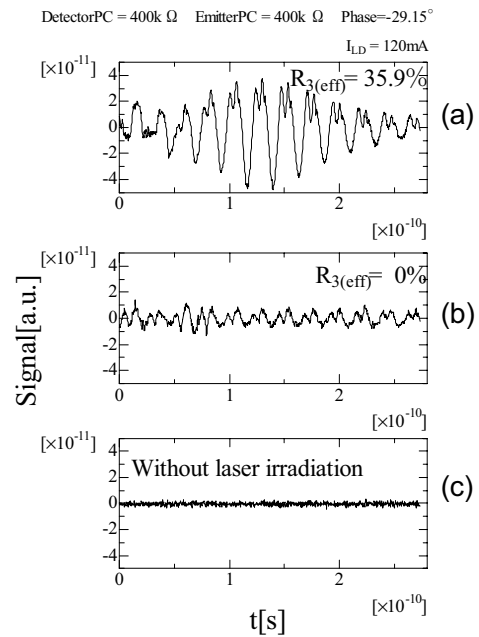


図3 テラヘルツ波時系列. (a) $R_{3(\text{eff})} = 35.9\%$, (b) $R_{3(\text{eff})} = 0\%$.

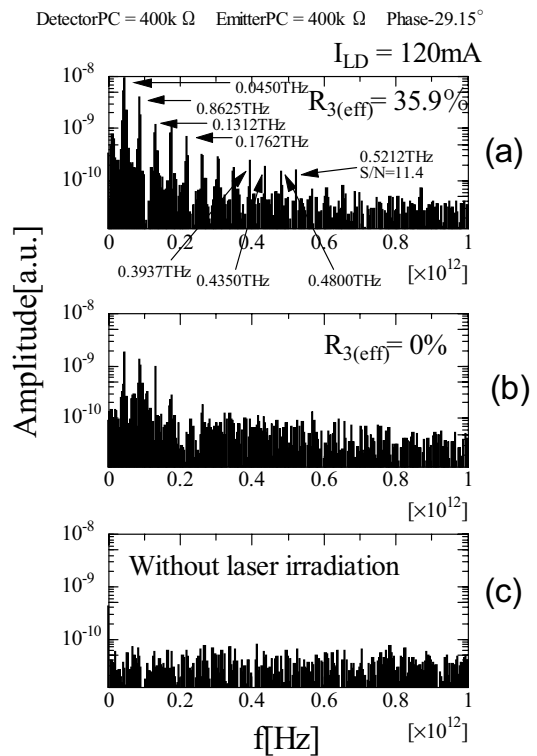


図4 テラヘルツ波スペクトル. (a) $R_{3(\text{eff})} = 35.9\%$, (b) $R_{3(\text{eff})} = 0\%$.

(a) .カオス光とした場合、 $f = 0.5212$ [THz]においても11.4倍のSN比が得られている。CW励起の場合は、 $S/N = 3.12$ であり、3倍程度SN比が改善されている。 $S/N = 10$ 以上で帯域を見積もると、CWレーザーの場合0.394 THz程度までしか信号が発生していないのに対し

て、カオス光励起の場合 0.5212 THz 程度まで信号を発生しており、帯域が拡大している。

外部鏡による光学遅延帰還を用いて半導体レーザーをカオス発振させることにより、発生するテラヘルツ波の帯域が 0.5 THz 以上に拡大した。検出器側のみシングルモード光ファイバーを用いる系を構築し、アライメントを簡便化した。シングルモードファイバーとレーザー光の結合効率は、CW、カオスレーザー光ともに 50% 以上である。検出器側の一方のみを単一モードファイバーとしても、カオス光の場合は単一モードに近い元のレーザーの空間的コヒーレンス性を保存したまま縦モードが多モード化するため、横モード選択の影響を受けずに相互相関が得られた。

また、カオス光を用いた場合は、時間平均としてのレーザースペクトルが安定しているため、安定してテラヘルツ波が発生する。

空間的コヒーレンスを保ったままスペクトルが拡大するレーザーカオス光の、光そのものとしての利用は、始まったばかりである。今後、光そのものとしての応用にも、多くの方の参加を希望する。

この研究は、大阪大学萩行正憲先生、長島健先生、福井大学谷正彦先生、栗原一嘉先生、山本晃司先生、福井大学名誉教授岩澤宏先生（故人）との共同研究により行われた。また、ともに研究を行った白尾拓也氏をはじめとする研究室の学生たちに感謝します。

この研究の一部は、平成 19 年度 JST 可能性試験 (FS)、平成 22 年度、平成 23 年度大学連携リーグ (福井県)、平成 23~24 年度 JST A-step、平成 24 年度・平成 25 年度大学連携リーグ (福井県) より資金援助を受けて行われた。

文 献

- 1) A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani and K. Kawase: "Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 5637-5646.
- 2) N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K.-I. Lin, J.-S. Hwang, J. Xu and X.-C. Zhang: "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 054105.
- 3) 萩行正憲, 谷 正彦, 長島 健: "テラヘルツ波応用技術", *応用物理*, **74** (2005) 709-717.
- 4) 永井正也, 田中耕一郎: "テラヘルツ時間領域分光の基礎と応用", *応用物理*, **75** (2006) 179-187.

- 5) M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai and M. Hangyo: "Multiple-frequency generation of sub-THz radiation by multimode LD excitation of photoconductive antenna," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, **7** (1997) 282-284.
- 6) F. T. Arecchi, G. L. Lippi, G. P. Puccioni and J. R. Tredicce: "Deterministic chaos in lasers with injected signal," *Opt. Commun.*, **51** (1984) 308-314.
- 7) J. Ohtsubo: *Semiconductor Lasers* (Springer, Berlin, 2005); *ibid.*, 2nd ed. (Springer, Berlin, 2008).
- 8) F. Kuwashima, T. Ichikawa, I. Kitazima and H. Iwasawa: "Chaotic oscillation in a single-mode class A He-Ne laser (6328Å) II," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 6321-6326.
- 9) F. Kuwashima, I. Kitazima and H. Iwasawa: "The chaotic oscillation of the single-mode He-Ne (6328Å) class A laser," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L325-L328.
- 10) O. Morikawa, M. Tonouchi and M. Hangyo: "A cross-correlation spectroscopy in subterahertz region using an incoherent light source," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 1519-1521.
- 11) M. Tani, O. Morikawa, S. Matsuura and M. Hangyo: "Generation of terahertz radiation by photomixing with dual-and multiple-mode lasers," *Semicond. Sci. Technol.*, **20** (2005) S151-S163.
- 12) 乗島史欣: "レーザーカオスを用いた THz 波の発生", *レーザー研究*, **39** (2011) 502-507.
- 13) O. Morikawa, M. Fujita and M. Hangyo: "Improvement of signal-to-noise ratio of a subterahertz spectrometer using a continuous-wave multimode laser diode by single-mode fiber optics," *Appl. Phys.*, **110** (2011) 063107.
- 14) O. Morikawa, M. Fujita, K. Takano and M. Hangyo: "Sub-terahertz spectroscopic system using a continuous-wave broad-area laser diode and a spatial filter," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 881-883.
- 15) H. Iwasawa: *Frontiers of Highly Efficient Photochemical Processes: Reports of a Grant-Aid for Special Research Project of the Ministry of Education, Science and Culture, Japan* (Department of Engineering, Kyoto University, 1989) p. 27.
- 16) 乗島史欣, 谷口真一郎, 野中孝樹, 新納 誠, 岩澤 宏, 渋谷享司, 萩行正憲: "レーザーカオス光を用いたテラヘルツ波の発生", *レーザー学会第 366 回研究会報告*, RTM-08-31 (2008) pp. 9-14.
- 17) 乗島史欣, 谷口真一郎, 野中孝樹, 萩行正憲, 岩澤 宏: "レーザーカオス光によるテラヘルツ波の広帯域化", *レーザー学会第 391 回研究会報告*, RTM-09-25 (2009) pp. 7-12.
- 18) 乗島史欣, 谷口真一郎, 谷 正彦, 栗原一嘉, 萩行正憲, 長島 健, 岩澤 宏: "ファイバカプラとレーザーカオスを用いた THz 波の安定化と広帯域化", *電気学会論文誌 A*, **132** (2012) 734-740.
- 19) N. Schunk and K. Petermann: "Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback," *IEEE J. Quantum Electron.*, **24** (1988) 1242-1247.
- 20) R. W. Tkach and A. R. Chraplyvy: "Regimes of feedback effects in 1.5- μm distributed feedback lasers," *J. Lightwave Technol.*, **4** (1986) 1655-1661.

(2013 年 12 月 10 日受理)