

シンポジウム

## 戻り光を持つ利得変調多モード半導体レーザーを光源とする THz 時間領域分光法

THz time-domain spectroscopy using a gain-switched multimode laser diode with delayed optical feedback

○和田健司, 松山哲也, 岡本晃一, 桑島史欣<sup>1</sup> (大阪公立大学, <sup>1</sup>福井工業大学)Kenji Wada, Tetsuya Matsuyama, Koichi Okamoto, Fumiyoshi Kuwashima<sup>1</sup>(Osaka Metropolitan Univ., <sup>1</sup>Fukui Univ. of Technology)

## 1. はじめに

THz 時間領域分光法 (THz-TDS) は, 室温で THz 領域の分光を可能とする優れた手法であり, THz 分野の進展を牽引する技術として確立されている[1]. 一般的に THz-TDS 用の光源には, フェムト秒モード同期レーザーが用いられるが, 小型安価な半導体レーザー(LD)も利用可能である[2, 3]. 特に, 戻り光を持つマルチモード半導体レーザー(MMLD)の場合, シンプルな装置構成ながら効率良く時間的に安定な THz-TDS 出力を取得できることが報告されている[4].

我々は, これまでに, マルチモードレート方程式を用いた数値解析を行い, 戻り光 MMLD がピコ秒パルス発振を伴う間欠性カオス発振状態にあるとき, 高効率, 広帯域な THz-TDS 出力が得られることを見積もった[5, 6]. そこで今回は, 注入電流を変調し, 積極的にピコ秒パルスが発生する励起条件における THz-TDS 出力の高効率化, 広帯域化について数値的に調べたので報告する.

## 2. 計算法

数値シミュレーションには, 複素光電界(縦モード 61 本)とキャリア密度を変数とし, ランジュバンノイズ項および戻り光項を含むマルチモードレート方程式を用いた. レーザーのパラメータは, 中心波長 800 nm のファブリーペローLD に適した値に設定した. 縦モードの間隔は, 活性層の屈折率 3.6 および共振器長 300  $\mu\text{m}$  から 139 GHz に設定した. LD への注入電流  $I$  は, 直流バイアス電流  $I_{dc}$  に変調周波数  $f_m$  で正弦波状に変調された振幅  $I_{mw}$  の変調電流が重畳された次式で与えた.

$$I = I_{dc} - I_{mw} \cos(2\pi f_m t) \quad (1)$$

このときの LD 出力を光伝導アンテナに入射することにより, 光キャリア(時間波形  $N_{ph}(t)$ )が発生することを想定する. 光伝導アンテナに電圧印加することにより光キャリアは瞬時電流となり, 波形の時間微分  $dN_{ph}(t)/dt$  に比例した THz 波を発生する. この THz 波を検出側の光伝導アンテナ内で発生した光キャリア  $N_{ph}(t)$  と相互相関させ, 相関波形(外部電流波形に相当)をフーリエ変換することにより, THz-TDS 出力スペクトル  $\omega |N_{ph}(\omega)|^2$  ( $\omega$ : 角周波数)を得る. ここで, 光伝導アンテナは広い帯域を持ち, 発生する光

キャリアの時間波形は LD 出力光の強度波形に比例すると仮定した.

## 3. シミュレーション結果

## 3-1. 変調電流振幅の影響

Fig. 1 に, 直流バイアス電流  $I_{dc}$  をしきい値電流  $I_{th}$  に, 変調周波数  $f_m$  を 1 GHz に設定し, 変調電流振幅  $I_{mw}$  を  $I_{th}$  の 1 倍(a1, a2), 2 倍(b1, b2), 3 倍(c1, c2)に変化させたときの LD 出力スペクトル(a1, b1, c1)と THz-TDS 出力(a2, b2, c2)を示す.

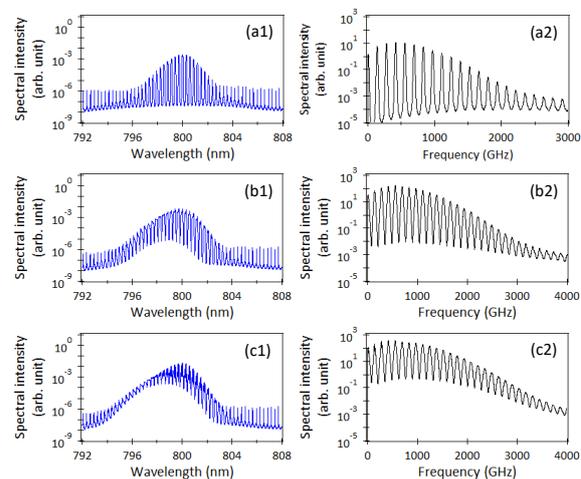


Fig. 1 Simulated LD spectra (a1, b1, c1) and THz-TDS outputs (a2, b2, c2) when the modulated current amplitude  $I_{mw}$  is set to 1.0  $I_{th}$  (a1, b1), 2.0  $I_{th}$  (b1, b2), and 3.0  $I_{th}$  (c1, c2), respectively. The dc bias current  $I_{dc}$  and the modulation frequency  $f_m$  are set to 1.0  $I_{th}$  and 1 GHz, respectively.

LD 出力スペクトル(a1, b1, c1)に対応する時間波形は, 個々のモードでは振幅がカオス的に変動するパルス発振を呈したが, 全モード出力を合成した光パルスの包絡線は一定形状となり, パルス幅はそれぞれ, (a1) 48.0 ps, (b1) 21.5 ps, (c1) 16.1 ps と見積もられた. (a1, a2)の結果は, 前回の戻り光 MMLD の解析において, 直流バイアス電流  $I_{dc} = 1.5 I_{th}$  の条件で高効率, 広帯域な THz-TDS 出力を得た戻り光結合係数  $f_c = 0.4$  の場合によく一致している. さらに(b1, b2), (c1, c2)の結果から, 変調電流振幅の増加に伴い, LD スペクトルおよび THz-TDS 出力の強度が高まり, 帯域も拡大していることがわかる. したがって, 装置構成は少し複雑になるが, 注入電流を変調

## シンポジウム

して積極的に MMLD からピコ秒パルスが発生させた場合、戻り光帰還時よりさらに容易に THz-TDS 出力の高効率化、広帯域化が図れることがわかった。

また、変調電流振幅を増加すると、発生するピコ秒パルスのパルス幅が短くなり、各モードの線幅が広がる。そのため、隣接モード間でスペクトルの重なりが増え、(a1)のコム状の LD スペクトルが(c1)のように連続スペクトルに近づく。これを反映して、(c2)の THz-TDS 出力にも連続スペクトル化の傾向が見られる。

## 3-2. 複数台の MMLD 出力の光波合成

分光応用の観点から、THz-TDS 出力の連続スペクトル化は重要である。そこで、複数台の MMLD の出力を光波合成して LD スペクトルの連続化を図った。Fig. 2 に数値計算例を示す。Fig. 1(b1, b2)の MMLD1 台の場合を基準として、MMLD2 台(d1, d2)と MMLD4 台(e1, e2)の場合の LD スペクトル(d1, e1)と THz-TDS 出力(d2, e2)を示す。MMLD2 台の場合は、一方の MMLD 出力スペクトルを縦モード間隔の半分 (69.5 GHz) シフトさせ、MMLD4 台の場合は、3 台の MMLD 出力スペクトルを縦モード間隔の4分の1 (34.75 GHz) ずつシフトさせ、それら複数台の MMLD からのマルチモード出力を光波合成した。

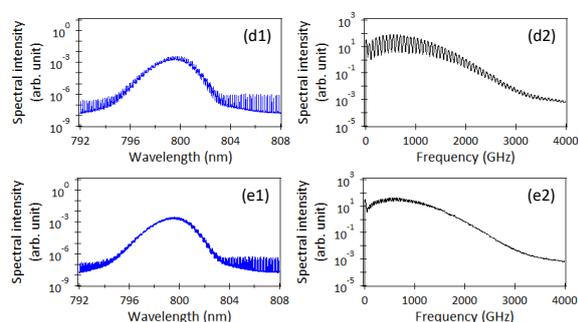


Fig. 2 Simulated LD spectra (d1, e1) and THz-TDS outputs (d2, e2) when outputs from two MMLDs and four MMLDs are synthesized, respectively.  $I_{dc}$ ,  $I_{mw}$  and  $f_m$  are set to  $1.0 I_{th}$ ,  $2.0 I_{th}$ , and 1 GHz, respectively.

MMLD2 台の場合、LD スペクトル(d1)はほぼ連続化しているが、周波数チャープによる影響から、THz-TDS 出力(d2)にはコム状成分が残留する。そこで、MMLD を 4 台に増加すると、THz-TDS 出力(e2)は理想的にほぼ連続化することがわかった。ただし、(d2)や(e2)の THz-TDS 出力を実現するためには、時間領域で複数台の MMLD のパルス発振タイミングを一致させる必要があり、MMLD 台数の増加はシステム構成の複雑さを招くことに注意が必要である。

## 3-3. 戻り光の影響

Fig. 3 に、Fig. 2(d1, d2)の MMLD2 台の光波合成時に、戻り光を遅延往復距離 30 cm (遅延往復時間 1 ns)、結合係数  $f_c = 0.4$  の条件で帰還させた

ときの LD スペクトル(f1)と THz-TDS 出力(f2)の計算例を示す。

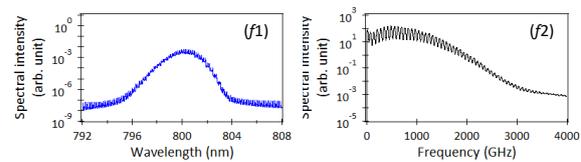


Fig. 3 Simulated LD spectra (f1) and THz-TDS outputs (f2) when outputs from two MMLDs with delayed optical feedback are synthesized. The coupling coefficient of the delayed optical feedback  $f_c$  is set to 0.4.  $I_{dc}$ ,  $I_{mw}$  and  $f_m$  are set to  $1.0 I_{th}$ ,  $2.0 I_{th}$ , and 1 GHz, respectively. The delay time of optical feedback fields is set to 1 ns.

戻り光の帰還により、対応する時間領域では、間欠性カオス発振が生じ、平均パルス波形のパルス幅は 21.5 ps から 18.5 ps まで短縮することを確認した。これにより各モードの線幅が広がり、Fig. 2(d2)より Fig. 3(f2)の場合において、THz-TDS 出力の連続スペクトル化が進行していることがわかる。また、THz 波発生は、光キャリア波形の時間微分に比例するため、パルス幅の短縮は THz 波発生を増大させる。これを反映して、戻り光有りの LD 出力エネルギー(Fig. 3(f1))は、戻り光なしのそれ(Fig. 2(d1))に対して 1.4 倍に留まるが、対応する戻り光有りの THz-TDS 出力エネルギー(Fig. 3(f2))は、戻り光なしのそれ(Fig. 2(d2))に対して 2.2 倍に増大した。

## 4. まとめ

マルチモードレート方程式を用いて、THz-TDS 用光源としての利得変調 MMLD の特徴について数値的に調べた。その結果、変調電流振幅を増加することにより、戻り光 MMLD よりも容易に THz-TDS 出力の高効率化、広帯域化が図れることがわかった。また、パルス発振のタイミングを一致させた複数台の MMLD からの出力を光波合成することより、THz-TDS 出力が連続スペクトル化することを見積もった。さらに、利得変調 MMLD に戻り光を帰還させることにより、高効率化、広帯域化、連続スペクトル化がより向上することも確認した。

## 参考文献

- 1) *Terahertz Optoelectronics*; K. Sakai, Ed.; Springer, Berlin, Germany, 2005.
- 2) M. Tani, et al., *IEEE Microw. Guid. Wave Lett.* 1997, 7(9) 282–284.
- 3) O. Morikawa, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999, 38(3A), 1388–1389.
- 4) F. Kuwashima, et al., *Opt. Express* 2020, 28(17), 24833–24844.
- 5) レーザー学会第 42 回年次大会, S05-14a-XII-03.
- 6) レーザー学会第 43 回年次大会, S12-20a-II-03.