

駆動電流への変調重畳によるブロードエリアレーザ
の安定化とサブテラ ヘルツ分光器への応用

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-06-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 森川, 治, 藤田, 正実, 萩行, 正憲, 藤田, 正実, HANGYO, Masanori メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15053/0000000271

駆動電流への変調重畳によるブロードエリアレーザの安定化とサブテラヘルツ分光器への応用

森川 治¹、藤田 正実²、萩行 正憲³

Stabilization of a Broad-Area Laser Diode by Modulating the Driving Current and its Application to a sub-THz Spectroscopic System

Osamu Morikawa, Masami Fujita, and Masanori Hangyo

Abstract

Power of a light beam from a broad-area laser diode (BLD) is fluctuating with the frequency from a few GHz to about 0.5 THz because of the optical beat. The beam can be used to construct a spectroscopic system in the frequency range of sub-THz using photoconductive antennas. However, some BLD shows unstable oscillation with fluctuating optical spectrum. We can stabilize such a BLD by applying modulation with the depth of about 10% on the driving current. We show that the signal of the sub-THz spectroscopic system can be stabilized if the BLD in the system is stabilized by modulating the driving current.

1. はじめに

テラヘルツ領域とはおよそ 100GHz から 10THz 程度までの周波数領域を指し、電磁波のエネルギーに換算すると約 0.4meV から約 40meV に対応する。この周波数領域には分子の回転スペクトル、巨大分子の振動モード、強誘電体などのソフトモード、超伝導ギャップ、半導体中の励起子の束縛エネルギーやフリーキャリアによる吸収など数々の励起モードが存在し、物性の観点から重要な周波数領域である^{1),2)}。またテラヘルツ領域の電磁波は電波的な物質透過性を有する最短波長域であり、実用に適した空間分解能を活かして物質の透視イメージングに利用可能である³⁾。これらの技術を実用化するにはテラヘルツ領域の簡便な発生・検出器がのぞましいのに対し、1980 年代以前は黒体炉のような微弱な光源、あるいはシンクロトロン放射光や自由電子レーザなどの大型・高コストの発生源しかなかった。また高感度な検出器としては、液体 He 冷却の必要なボロメータなど維持・運転に労力を要する装置しかなく、上記技術の実用化を妨げていた。

しかし、1980 年代に高速繰り返しフェムト秒レーザを用いたテラヘルツ領域の電磁波の発生・検出法が提案され、比較的小型で扱いの簡便な装置が提供されるようになった^{1),4)}。その中でも多く用いられているのは光伝導アンテナを用いた方法である。光伝導アンテナの概略を図 1 に示す。半絶縁性 GaAs 基板上に光伝導膜を成長させ、さらにその上に金属電極を 2 つつけた形になっている。光伝導膜は①1ps 以下のキャリア寿命、②高いキャリア移動度、③高い耐電圧を持つことが必要であり、MBE (Molecular Beam Epitaxy) で 200℃程度の低温で GaAs を成

¹ 海上保安大学校、morikawa@jcga.ac.jp

² 海上保安大学校、fujita@jcga.ac.jp

³ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、hangyo@ile.osaka-u.ac.jp

長ささせた後、500℃程度の温度で熱処理した膜(LT-GaAs 膜)が多用されている^{4)~6)}。電極中央のブリッジ部分はアンテナとしても作用し、図 1(a)および(b)のようなボウタイ型のアンテナのほか、必要な周波数特性や放射パターンに応じてさまざまな形状のものが使われている。電圧印加した光伝導アンテナにパルス幅が 100fs (1fs は 10^{-15} s)程度で繰り返し周波数が 100MHz 程度の光パルス列を照射するとアンテナに瞬時電流が流れ、同じ繰り返し周波数のパルス電磁波列が発生する[図 1(a)]。通常、検出にも光伝導アンテナを用いる。発生した電磁波を放物面鏡などで検出側の光伝導アンテナに収束させる。同時に光伝導アンテナを高繰り返し光パルスでトリガーし、電磁波の電場を同期検出する。時間遅延を用いて電磁波電場検出のタイミングをずらしていけば電磁波パルスの波形を検出することができる。この電磁波送受信系は主として分光用途に用いられており、THz time-domain spectroscopic system (THz-TDS)と呼ばれる。THz-TDS では電磁波径路への試料挿入により、生じた電磁波の減衰だけでなく位相シフトも検出することができるため、クラマース・クロニッヒ解析をしなくても複素光学定数を求めることができるという点でユニークな分光器である。また信号は 10^4 程度の高い SN 比が比較的簡単に得られるため⁷⁾、IC などの透過像を得るのにも利用できる⁸⁾。しかし THz-TDS は照射光源として数百万円以上する高価なフェムト秒レーザを使用しているため、システムのコストが高くなってしまいがちが難点であった。

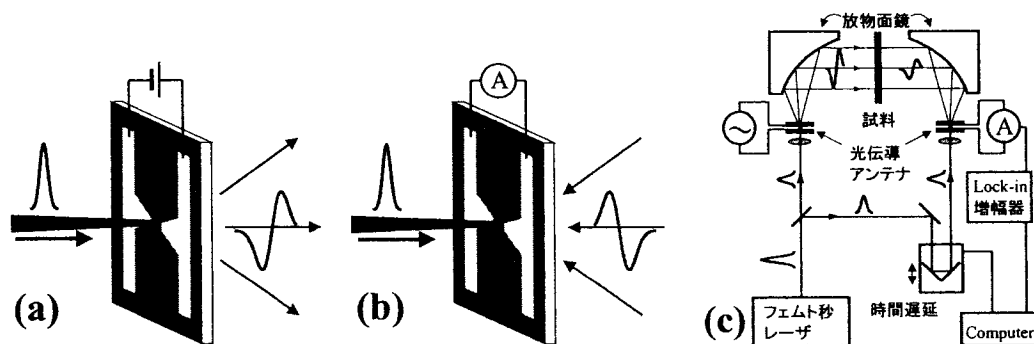


図 1 (a)光伝導アンテナを用いたパルス THz 電磁波の発生。(b) 光伝導アンテナを用いたパルス THz 電磁波の検出。(c)光伝導アンテナを用いた送受信系(THz-TDS)。

そこで、我々はフェムト秒レーザの代わりに安価で小型のマルチモード半導体レーザを用いた分光器を提案した。光伝導アンテナを用いた電磁波発生・検出では、光強度の高速変調が高周波電磁波に変換され、同期検出されている。このため、規則的な光パルス列でなくとも強度変調を含む光であれば電磁波発生・検出に利用できる。例えば、マルチモードレーザ光では複数の波長成分が存在し、それらの重畳によりうなり(光ビート)が生じているので光強度変調が発生している。市販のマルチモード LD(laser diode)のうち、発光領域幅が $3\mu\text{m}$ 程度のものは普通、単一の横モードかつ複数の縦モードでレーザ発振しており、数本~十数本の線スペクトル成分がある。スペクトル成分間の光周波数差は典型的には数十 GHz なのでサブテラヘルツ帯の電磁波発生⁹⁾・検出¹⁰⁾に利用できる。この他に発光領域幅が $50\mu\text{m}$ もしくはそれ以上の LD[ブロードエリア LD(BLD)]は複数の横モードかつ複数の縦モードでレーザ発振が生じてい

るので極めて多数の発振線を含んでいる。これを光源に用いれば発生する電磁波は数 GHz～約 0.5THz 程度の sub-THz 帯の連続スペクトルを示し¹¹⁾、サブテラヘルツ域の分光器を構成できる[multimode LD time-domain spectroscopic system (MLD-TDS)もしくは poorman's TDS]^{12),13)}。

これまでの実験で波長 810nm の BLD(JDS Uniphase 社 SDL-2352)を MLD-TDS に用いれば再現性のよい安定した信号が得られ、数十 GHz から約 0.5THz の範囲の分光測定ができた¹³⁾。これに対し、波長 830nm の BLD(浜松ホトニクス社 L9277)を用いた場合は信号の再現性があまりよくなく、同条件の測定を繰り返しても得られる信号波形は完全には一致しないことがわかっていて[†]。MLD-TDS の分光測定では試料を電磁波経路に入れたときと入れないときの信号波形の Fourier 成分の比較から光学定数を計算するので、再現性は分光測定のために重要である。一方、波長 830nm の BLD は将来、光混合による MLD-TDS の高周波化実験において必要になる。光混合による高周波化実験とは BLD の光と、波長が少しだけ離れたシングルモード LD の光を混合するというものである。光混合によりスペクトル幅が広がるので BLD 単独の場合よりも高周波の光ビートが生じ、より高周波の信号を測定することが可能になると期待される。現在市販されているもののうち、外部共振器を必要としない安価で高出力のシングルモード LD は 830nm のものしか見当たらないので、光混合の相手としては波長 830nm の安定な BLD を用意することが必要になる。発光領域幅が狭い(数 μm)の LD については駆動電流への約 600MHz 以上の高周波重畳によるモードホッピング雑音や戻り光誘起雑音の低減がよく知られているが¹⁴⁾、筆者らの知る限りでは BLD についてのそのような安定化の試みはない。本稿では光スペクトルが不安定な波長 830nm の BLD(浜松ホトニクス L9277)を用いた MLD-TDS で BLD の駆動電流に変調をかけることによる信号の安定化を提案し、実験によってその有効性や安定化のメカニズムを考察することを目的とする。

2. 実験

MLD-TDS の構成を図 2(a)に示す。2 つの BLD、SDL-2352(波長 810nm)と L9277(波長 830nm)の発光領域幅は両方とも 50 μm である。最大発光強度は SDL-2352 が 500mW、L9277 が 1W である。しかし光ファイバ端面の損傷を避けるため、L9277 の方は最大光量よりも出力を落として使用した。駆動電流については SDL-2352 は 600mA、L9277 は 860mA とした。光ファイバへの集光レンズの直前でのビーム強度はいずれの BLD を用いた場合も約 300mW であった。BLD の光はシングルモード光ファイバカプラに入射させ発生器・検出器となる 2 つの光伝導アンテナに導いた。ここで「シングルモード光ファイバカプラ」とはシングルモード光ファイバ 2 本を中央で融着した構造となっており、光を分岐する働きを持つ。通常のビームスプリッタを用いると MLD-TDS 信号スペクトルが離散的な線スペクトルとなり、線と線の間「分光器として使用した場合には信号が弱いため SN 比の悪い周波数域」が出現してしまう。これに対し、シングルモード光ファイバカプラを用いると信号スペクトルは、信号が弱いため SN 比が悪かった周波数域でも分光に十分な信号強度を持つようになり、分光に有利である¹³⁾。なお、用いた BLD の発光領域幅は 50 μm であるのに対し、ファイバのコア径は 5 μm しかないためファイバへの入光効率は高くない。BLD から入射した光強度に対し、2 つの光ファイバ出口

[†]L9277 を使用開始して最初の実験では信号再現性はよかったが、数回の実験の後、測定したときには再現性は悪くなっていた。しかし、光強度に変化は見られなかった。

から得られる光強度はそれぞれ約 1/100 程度で¹³⁾、光伝導アンテナの光照射強度は 3~4mW 程度であった。発生器側の光伝導アンテナに照射された光はサブテラヘルツ域の電磁波に変換され、軸はずし放物面鏡を用いて検出器側の光伝導アンテナに収束される。同時にシングルモード光ファイバカプラからの光を検出器側の光伝導アンテナに照射した。検出器側の光伝導アンテナに到達する電磁波と照射光のタイミングは、シングルモード光ファイバカプラの出力端を自動ステージに設置し、これを動かすことによりずらしていった。電磁波は発生器側の光伝導アンテナに印加する電圧を 11kHz の交流電圧とすることで変調をかけ、Lock-in 検出した。

不安定な BLD(L9277)安定化のための駆動電流への変調重畳は BLD の電源(ILX Lightwave 社 LDX-3545)の変調入力端子を用いて行った。この端子の変調入力帯域は 200kHz しかないので、発光領域幅の狭い LD でよく使用されるもの(約 600MHz 以上)よりも低い周波数(97kHz)の変調を外部発信器から入力した[図 2(a)]。駆動電流 860mA に対し、 $\pm 30\text{mA}$ (60mA_{pp})の変調を加えた。

BLD のスペクトル観察の実験配置図を図 2(b)に示す。ファイバカプラから出射した光をレンズで平行化した後、格子間隔 1/1200mm の回折格子に入射した。ビームは進行方向が回折格子の面に垂直になるように入射させた。中心波長 830nm の場合、1 次回折光が約 84.9° の方向に出るので、回折格子から約 75cm の距離の場所にスクリーンを置き、1 次回折光を赤外線ビューア(IR ビューア)で目視観察した。

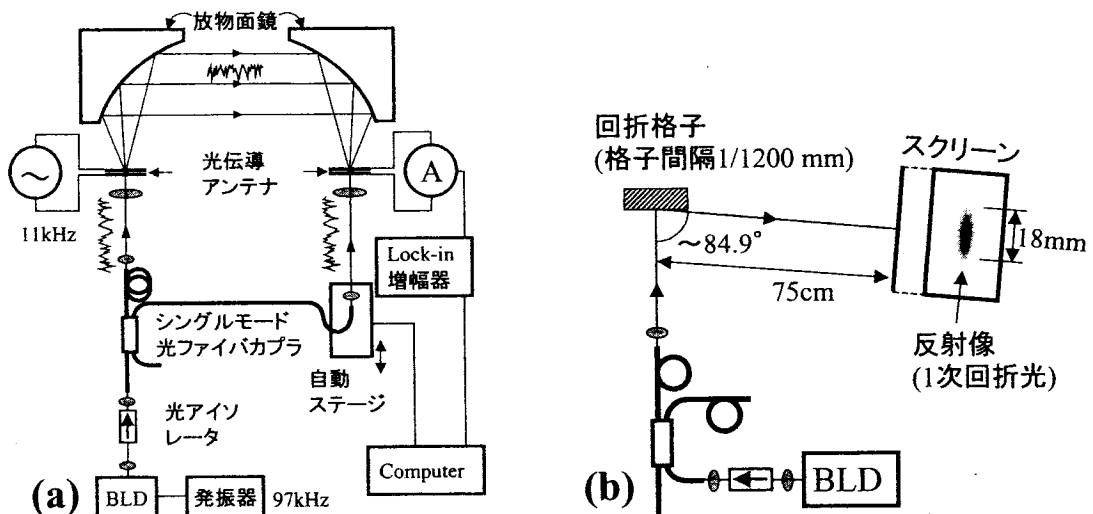


図 2 (a)MLD-TDS の実験配置。(b)BLD のスペクトル観察の実験配置図。

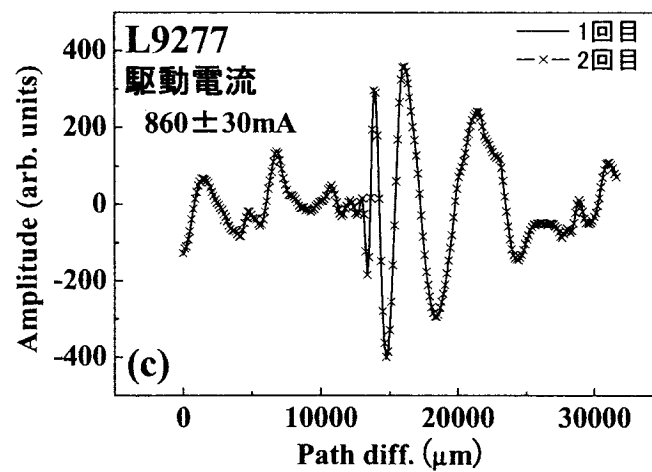
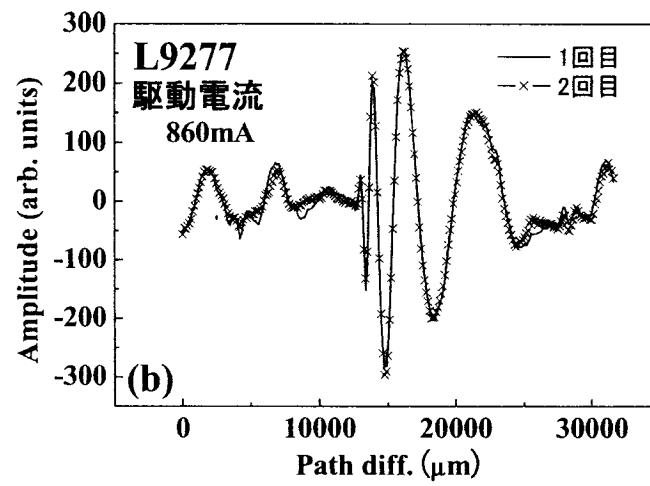
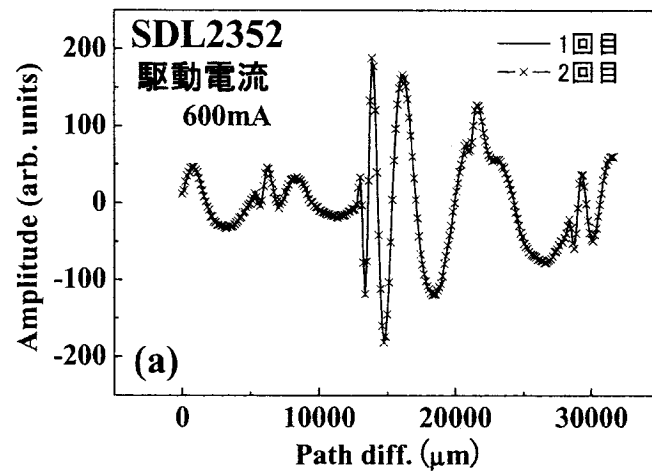


図 3 同一条件で MLD-TDS 信号測定を 2 回繰り返した結果。(a)SDL-2352 を用いた場合(変調なし) (b)L9277 を用いた場合(変調なし) (c) L9277 を用いた場合(変調あり)。

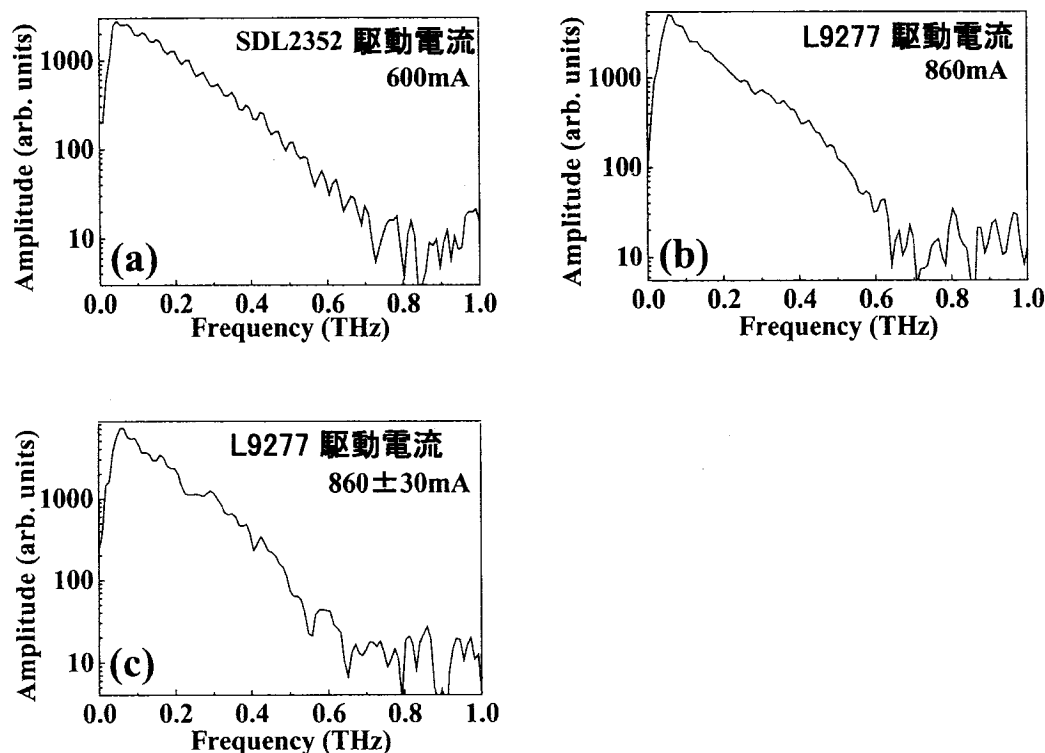


図4 信号波形から計算した Fourier スペクトル。(a)SDL-2352 を用いた場合(変調なし)(b)L9277 を用いた場合(変調なし)(c) L9277 を用いた場合(変調あり)。

3. 実験結果と考察

図2(a)の実験系に SDL-2352(波長 810nm)と L9277(波長 830nm)を用いて得られた信号波形をそれぞれ図 3(a)、3(b)に示す。同じ測定を 2 回繰り返すことにより信号の再現性を確かめた。それによると、図 3(a)では 2 回の測定による信号波形がよく一致しているのに対し、図 3(b)では信号波形が完全には一致せず、信号再現性が劣っていることが分かる。これらの波形から Blackman の window 関数を用いて計算した Fourier スペクトルを示したのが図 4(a),4(b)であり、約 10GHz～約 0.6THz の範囲の信号が出ていることがわかる。MLD-TDS 信号は光強度の自己相関に装置関数を畳み込み積分したものである¹²⁾、この装置では約 10GHz から 0.6THz 程度までの電磁波が発生していることを示している。さらに信号再現性の分光測定への影響を見積もるため、2 回の測定による波形の Fourier 成分の比較も行ってみた。同じ測定を繰り返した時の Fourier 成分は、信号が安定していれば振幅比は 1、位相差は 0 である。図 5(a)と 5(b)に図 3(a)と 3(b)の信号波形の Fourier 成分比較結果を示す。SDL-2352 を用いた場合[図 5(a)]には約 10GHz から約 0.45THz の範囲で 1 回目と 2 回目の Fourier 振幅比がほぼ 1(約 ± 20% 以内)で位相差がほぼ 0(約 ± 0.1rad 以内)であり、この範囲での分光計測ができることを示している。これに対し、L9277 を用いた場合には、Fourier 成分は約 10GHz から 0.6THz 付近まで存在する[図 4(b)]のに対し、0.3THz 以上で Fourier 振幅比が 1 から大きく外れており[図 5(b)]、分光計測ができなくなっているのがわかる。

MLD-TDS 信号の不安定性の原因を探るため、図2(b)の配置で BLD の光スペクトルの様子を観察した。L9277 の光スペクトルには幅があるため反射像は 18mm 程度の幅を持っているのが観察された。さらによく見ると長さ約 18mm の像中の光強度分布がふらついているのがわ

かった。つまり、MLD-TDS 信号が安定化しなかったのは照射光のスペクトル分布が不安定で、照射光の中に含まれる光強度変動のスペクトルも揺らいでいたためであると考えられる。

そこで BLD の安定化のため、駆動電流に変調を重畳してみた。図 3(b)、5(b)では L9277 の駆動電流は 860mA としていたがこれに 97kHz、60mA_{pp} の変調をかけることを試みた。すると、図 2(b)の配置で観察した回折格子の反射像は安定化し、像の長さは 18mm のままで像中の光強度分布のふらつきがなくなることが観察された。図 3(c)に 97kHz、60mA_{pp} の変調入りの電流で駆動した L9277 による信号波形を示す。図 3(b)と比べて、信号再現性がよくなっていることが分かる。またその Fourier スペクトル[図 4(c)]の周波数域は電流変調をかける前[図 4(b)]とほとんど差がなく、駆動電流に変調をかけることにより周波数域が狭くなるなどの悪影響はほとんどないことが分かる。このことは、回折格子の反射像の幅が変わらず、光スペクトル幅が変調印加により変化しないことに対応している。図 3(c)の信号波形の Fourier 成分の比較結果を図 5(c)に示す。変調をかける前[図 5(b)]は約 10GHz～約 0.3THz の範囲でしか Fourier 成分が安定(振幅比が約±20%以内かつ位相差が±約 0.1rad 以内)していなかったのに対し、変調をかけることによって約 10GHz～約 0.5THz の範囲で Fourier 成分が安定化したのがわかる。変調周波数を 97kHz に固定した場合、変調振幅が約 30mA_{pp} 以下では信号の安定化は不十分で、安定化のためには 60mA_{pp} 程度の変調が必要であった。

BLD は通常の半導体レーザに比べ活性層幅が広いためホールバーニングやセルフフォーカシングといった現象により不安定発振を起こすなど、挙動は複雑である¹⁵⁾。今回の実験結果だけでは駆動電流の変調重畳による安定化のメカニズムは明らかにはならないが、大まかに以下のような状況が考えられる：変調をかけないとき L9277 の光スペクトル(回折格子による反射像)はふらつくことから、L9277 には準安定な発振状態がいくつかあると示唆される。一定電流で駆動しているときには、L9277 はそれら準安定状態の間をゆっくりと飛び移るためにスペクトルや MLD-TDS 信号に不安定性が出るものと思われる。一方、駆動電流に変調を重畳した場合には擾乱が加わるため、準安定な状態の間を高速で飛び移り、それらが平均化されて安定した光スペクトルや MLD-TDS 信号が検出されたと考えられる。

4. おわりに

今回実験で用いた波長 830nm の BLD(L9277)は発振状態が不安定で光スペクトルがゆらいでいたため、MLD-TDS に適用すると再現性の悪い信号が検出された。しかし、駆動電流に対して 1 割程度の変調(平均電流 860mA に対して 60mA_{pp})を加えると光スペクトルは安定し、MLD-TDS 信号も再現性のよいものが得られるようになった。今後の実験として、安定化がなされた L9277 と波長 830nm のシングルモード LD との光を混合して MLD-TDS に用いることにより、測定周波数域の高周波化が期待できる。

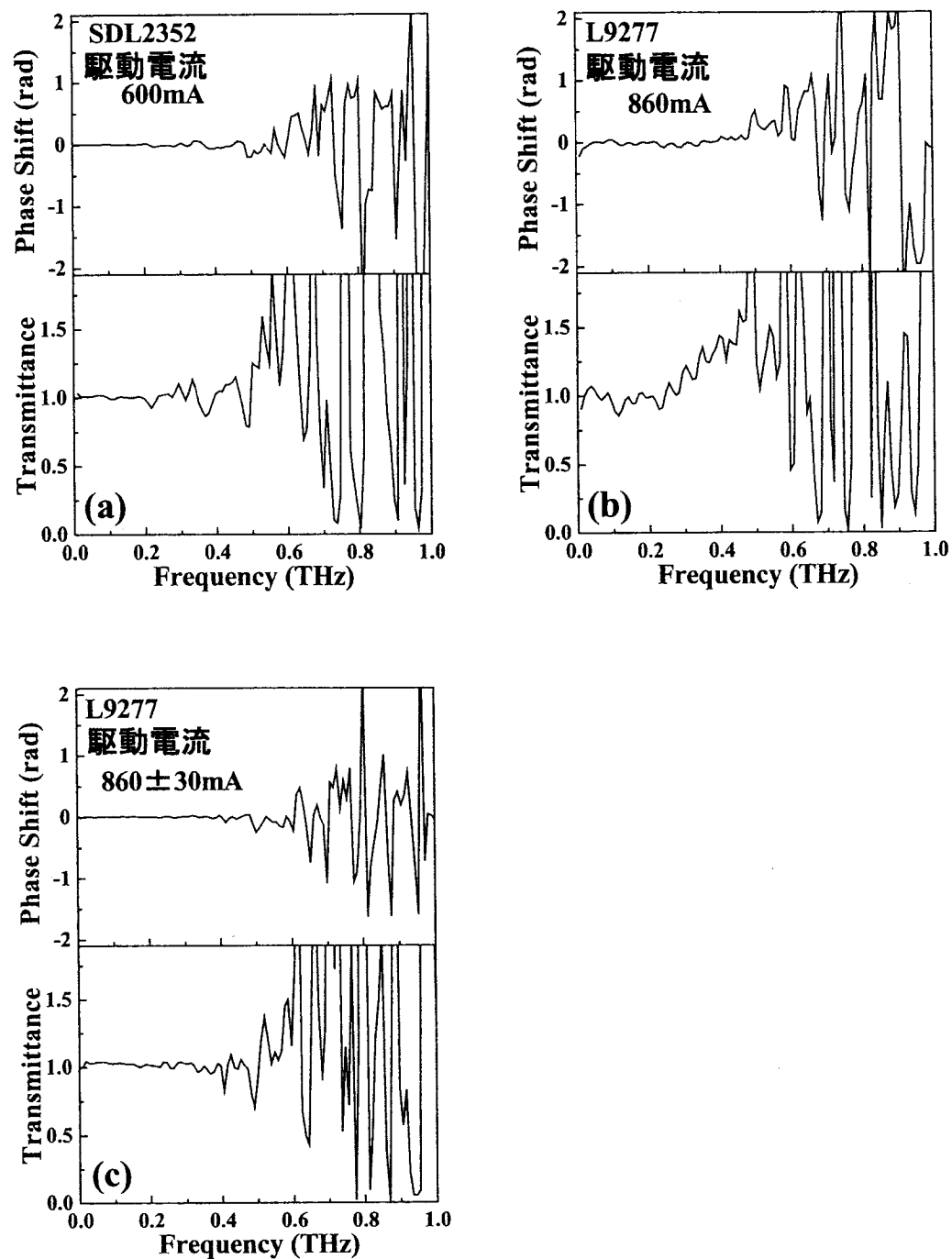


図5 繰り返し測定した MLD-TDS 信号(図3)の Fourier 成分の振幅比と位相差。(a) SDL-2352 を用いた場合(変調なし) (b) L9277 を用いた場合(変調なし) (c) L9277 を用いた場合(変調あり)

謝辞

平成 12 年度島津科学技術振興財団の研究開発助成金に感謝します。

- 1) 永井正也・田中耕一郎；応用物理, **75**, 179 (2006).
- 2) 萩行正憲；分光研究, **54**, 181 (2005).
- 3) 大谷知行・有吉誠一郎・佐々木芳彰・川瀬晃道；応用物理, **75**, 188 (2006).

- 4) 阪井清美・谷正彦；応用物理, **70**, 149 (2001).
- 5) I. S. Gregory, C. Baker, W. R. Tribe, M. J. Evans, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, and M. Missous; Appl. Phys. Lett., **83**, 4199 (2003).
- 6) K. A. McIntosh, K. B. Nichols, S. Verghese, and E. R. Brown; Appl. Phys. Lett., **70**, 354 (1997).
- 7) Y. Cai, I. Brener, J. Lopata, J. Wynn, L. Pfeiffer, J. B. Stark, Q. Wu, X. C. Zhang, and J. F. Federici; Appl. Phys. Lett., **73**, 444 (1998).
- 8) B. B. Hu and M. C. Nuss; Opt. Lett., **20**, 1716 (1995).
- 9) M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and M. Hangyo; IEEE Microwave Guid. Wave Lett., **7**, 282 (1997).
- 10) I. S. Gregory, W. R. Tribe, M. J. Evans, T. D. Drysdale, D. R. S. Cumming, and M. Missous; Appl. Phys. Lett., **87**, 034106 (2005).
- 11) O. Morikawa, M. Tonouchi, and M. Hangyo; Appl. Phys. Lett., **75**, 3772 (1999).
- 12) O. Morikawa, M. Tonouchi, and M. Hangyo; Appl. Phys. Lett., **76**, 1519 (2000).
- 13) O. Morikawa, M. Fujita, and M. Hangyo; Appl. Phys. Lett., **85**, 881 (2004).
- 14) 伊藤良一・中村道治；”半導体レーザー”、培風館 (1989) 8 章
- 15) 瀧本覚司・三ツ井英男・生源寺類・大坪順次；第 55 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 27a-ZH-6 1153 (2008).