

# マルチモード半導体レーザの高速光強度揺らぎを利用したサブテラヘルツ帯のヘテロダイン受信器

森川 治<sup>1</sup>、谷 正彦<sup>2</sup>、藤田正実<sup>3</sup>、萩行正憲<sup>2</sup>

A Heterodyne Receiver in the sub-THz Region Utilizing Rapid Intensity Fluctuation in a Beam from a Multimode Laser Diode

Osamu Morikawa<sup>1</sup>, Masahiko Tani<sup>2</sup>, Masami Fujita<sup>3</sup>, and Masanori Hangyo<sup>2</sup>

## Abstract

If a photoconductive antenna is irradiated with a laser beam including intensity modulation (frequency  $f_1$ ) and simultaneously an electromagnetic radiation (frequency  $f_2$ ) is incident from the backside of the antenna, an ac current with the frequency of  $|f_1 - f_2|$  is expected to be induced in the antenna. When  $f_1$  is near  $f_2$ , the frequency of the induced ac current  $|f_1 - f_2|$  is much lower than  $f_2$  and the ac current will be detected even if  $f_2$  is higher than 1 THz. In this paper, we employ the beam from the multimode laser diode (LD) for irradiation, which includes the intensity modulation due to the optical beat, and the electromagnetic radiation from a Gunn oscillator (50.3 GHz) to be incident on the photoconductive antenna. Using an electric spectrum analyzer and a lock-in amplifier we detect the ac signal which can be assigned to the ac current of the frequency  $|f_1 - f_2|$  and the dc signal which may be assigned to the thermoelectromotive effect or the rectification effect in the photoconductive antenna. The status of the intensity fluctuation in the LD beam is investigated using a transmitter-receiver system of the sub-THz radiation with two photoconductive antennas. It was shown that there appear drastic changes depending on the power of feed back beam to the LD.

## 1. はじめに

高周波電磁波の高速通信キャリアとしての役割は長距離用光通信の出現により取って代わられた感がある。しかし、近年では無線 LAN など、光通信を補完する新たな応用分野が広がっている。またサブテラヘルツ帯(約 100GHz~1THz)およびテラヘルツ帯(約 1THz~10THz)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る。波長は 1mm 周辺であるため、1mm 程度の空間分解能で非金属材料の透視イメージングが可能である。特に、サブテラヘルツ帯およびテラヘルツ帯の電磁波がよい透過性を示す非金属材料はさまざまな工業製品に使われているため、クラックや異物等を探す検査技術として応用発展が期待できる<sup>(1-3)</sup>。また、紙やプラスチックを透過することを利用してそれらに包まれたものの検査も可能である。例えば、郵便物中の違法薬物<sup>(3)</sup>や爆弾等危険物<sup>(4)</sup>の検査への応用なども考えら

<sup>1</sup> 海上保安大学校 基礎教育講座 morikawa@jcga.ac.jp

<sup>2</sup> 大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター

<sup>3</sup> 海上保安大学校 基礎教育講座

れる。これらのために必要な技術としてサブテラヘルツ帯やテラヘルツ帯の高周波数域で感度のよい受信器が要望されている。

サブテラヘルツ帯やテラヘルツ帯の受信器はいくつか提案されている。超伝導体を利用した SIS ミキサー受信器は非常に感度がよく帯域もサブテラヘルツ帯全域に及ぶものの、冷却が必要である<sup>(5)</sup>。ホットエレクトロンボロメータもやはり冷却が必要である<sup>(6)</sup>。金属針を点接触させた構造のショットキバリアダイオードは数 THz までに渡る広い周波数帯で感度があるものの、半導体上に針を垂直に立てた構造であり、機械的に脆弱である<sup>(7)</sup>。100GHz 以下の周波数域に関しては、電子非線形素子を用いたヘテロダイン検波器が市販されるようになっており冷却も不要である。しかしながら、さらに高周波域の検波を行う場合は局部発振器のコストが増大する。

サブテラヘルツ帯やテラヘルツ帯の受信器としては上記の他にレーザを用いたものがある。1980 年代末に高速繰り返しフェムト秒レーザを用いたサブテラヘルツ帯・テラヘルツ帯の電磁波の発生・検出法が開発された<sup>(8,9)</sup>。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は図 1 に示すようなものである。半絶縁性 GaAs 基板上に光伝導膜を成長させて、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)で低温成長させた GaAs 膜が多用されている。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他、周波数特性や放射効率に応じてさまざまなパターンが使われる。電磁波の検出は図 1(c)のような配置で行われる。電圧印加した光伝導アンテナを時間幅 100fs 前後(1fs は  $10^{-15}$ s)のパルス光で照射することによってパルス電磁波を発生させる。検出側の光伝導アンテナもパルス光で照射し、電磁波電場のサンプリング検出器として用いることによりパルス電磁波の波形を検出する。この系は主として分光用途に用いられ、THz time-domain spectroscopic system (THz-TDS)と呼ばれる。

光伝導アンテナ素子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ている。このため、パルス光でなくとも光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・光周波数の発振成分が存在し、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)の場合、数本～十数本の線スペクトル成分があり、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に利用できる<sup>(10)</sup>。すなわち、THz-TDS におけるパルス光をマルチモードレーザ光に置き換えることが可能である。ブロードエリア LD は極めて多数の発振線を含むので、これを光源に用いれば sub-THz 帯の分光器を構成できる(MLD-TDS)<sup>(11)</sup>。

ただし、パルスレーザを用いた場合でもマルチモードレーザを用いた場合でも、電磁波の発生器と受信器は同一レーザから発生した光パルスで照射されている。つまり発生器と受信器は独立ではなく、通信等への応用はしにくくなっている。イメージング応用に関しても、独立な受信器ではないために Gunn 発振器など高強度の発信器の信号を検出できない。本研究では電磁波の入射する光伝導アンテナを、高速強度変調を含む光で照射し、生じるヘテロダイン信号を観測するという手法で電磁波源とは独立な受信器を構成することを目的としている。この受信器は光伝導アンテナを用いているものの Gunn 発振器など受信器とは

無関係な発振器の電磁波を検出することができるため、そのような発振器と組み合わせて透過像イメージング装置を組むなどの応用が考えられる。また、LD の光ビートの様子について MLD-TDS を用いて調べることにより、LD の光強度変調スペクトルについても情報が得られたのであわせて報告する。

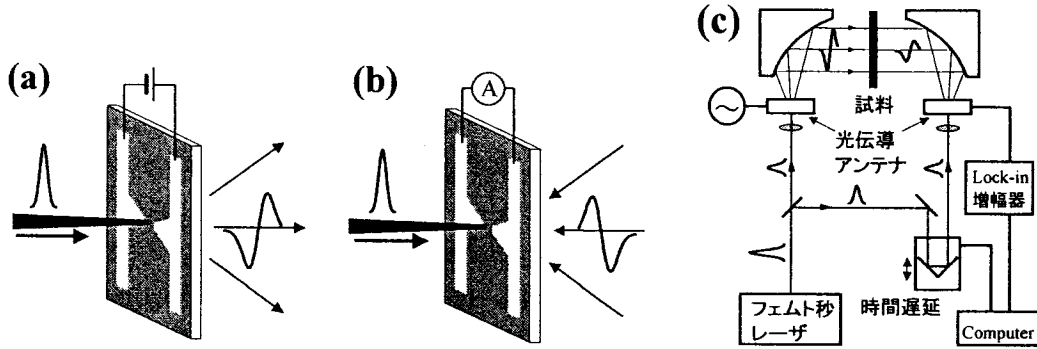


図1 (a)光伝導アンテナを用いたパルス THz 電磁波の発生。(b) 光伝導アンテナを用いたパルス THz 電磁波の検出 (c)光伝導アンテナを用いた送受信系(THz-TDS)。

## 2. フォトミキサー受信器の提案

光ビートを含む光の強度は平均値を中心にある周波数( $f$ )で上下している。つまり、光強度  $I(t)$  は周波数 0 の直流成分と周波数  $f$  の交流成分とを含んでいる。光伝導アンテナの伝導度は照射光強度に比例するので次式のように書ける。

$$\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

ここで  $\sigma_0, \sigma_1$  はそれぞれ直流成分の大きさと交流成分の振幅を表し、 $\sigma(t) > 0$  であるから  $\sigma_0 > \sigma_1$  である。アンテナに入射する電磁波の電場が  $E_0 \cos(2\pi f t + \phi)$  と書けるとすると生じる電流  $I(t)$  は

$$\begin{aligned} I(t) &= E_0 \cos(2\pi f t + \phi) \{ \sigma_0 + \sigma_1 \cos(2\pi f t) \} \\ &= \frac{E_0 \sigma_1}{2} \cos \phi + E_0 \sigma_0 \cos(2\pi f t + \phi) + \frac{E_0 \sigma_1}{2} \cos(4\pi f t + \phi) \quad (2) \end{aligned}$$

のようになり、直流成分(第1項)、周波数  $f$  の成分(第2項)、周波数  $2f$  の成分(第3項)を含んでいる。ここで  $\phi$  は光強度の変調と電磁波の間の位相差であり、 $\phi$  が変化すると直流成分が変化する。MLD-TDS ではさまざまな周波数の光強度変調と電磁波が含まれており、それぞれ直流電流とさまざまな周波数の電流を生み出しているが、このうち直流成分の合計を検出している。もしも MLD-TDS とは違って独立な電磁波源からの電磁波を光伝導アンテナに照射すると信号の周波数は変わってくる。単一光ビート(周波数  $f_1$ )を含む光と周波数  $f_2$  の電磁波を光伝導アンテナに入射した場合には、発生する電流の周波数は  $|f_1 - f_2|$ 、 $f_2$ 、 $f_1 + f_2$  であり、直流電流は発生しない(図2)。しかし、たとえ  $f_1$  と  $f_2$  がサブテラヘルツまたはテラヘルツ域にあったとしても、両者の周波数が近ければ電流のうち、周波数  $|f_1 - f_2|$  の差周波成分(ヘテロダイン信号)は十分低周波になるので観測可能になるはずである。本研究ではこのヘテロダイン信号を検出することによる高周波電磁波の検出を目指した。

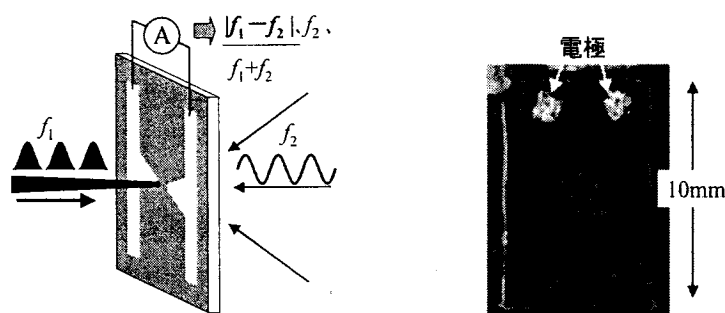


図2 ヘテロダイン検出の構成 図3 スパイラルアンテナの写真

### 3. スペクトルアナライザによるヘテロダイン信号観測

#### 3-1. 交流信号の検出

検出実験に用いる光伝導アンテナのアンテナパターンとしてはサブテラヘルツ帯で放射効率の高いスパイラルアンテナを用いた(図3)<sup>(12)</sup>。スパイラルパターンの全体幅は2mm、中心部の光伝導ギャップの間隔は5 $\mu$ mである。図4のような実験配置で光伝導アンテナに生じる差周波電流をスペクトルアナライザ(アンリツ MS2601A)で観測した。電磁波(50.3GHz)の発生には Gunn 発振器を用いた。光伝導アンテナの照射に用いた LD(JDS5422)は活性層幅が3 $\mu$ mと狭く、横モードパタンが単一であるため、光スペクトル上では発振線が等間隔に並んでいる。LDと光伝導アンテナの間には $\lambda/4$ 板および偏光板を入れ、 $\lambda/4$ 板の角度をまわすことによってLDへの戻り光強度を調節した[図4(b)・(c)]。ここで、LDへの戻り光を変えたのはLDの発振状態を変化させ、光ビートによる高速光変調の様子を変化させるためである。 $\lambda/4$ 板をまわすと光伝導アンテナへの照射偏光も変化する。しかし、光伝導アンテナを照射する直線偏光の角度を $\lambda/2$ 板で回転させた場合でも信号強度は最大でも2倍程度しか変化しないことがわかっているため、図4(b)と(c)における電磁波の受信効率の差は2倍以下であると考えられる。光伝導アンテナへの照射光強度は44mWであり、 $\lambda/4$ 板の角度にほとんどよらなかった。光伝導アンテナに生じた電流は前置増幅器を通してスペクトルアナライザに入れた。前置増幅器はOPアンプを用いて自作した。OPアンプの3dB帯域幅は175MHzであり、前置増幅器と光伝導アンテナの間は長さ約50mmの自立ワイヤでつないでおり、この他に寄生容量の影響も予想されることから、回路の帯域は175MHzよりもかなり低くなっているものと思われる。前置増幅回路の応答の線形性は、低周波電磁波源を用いて確認した。光伝導アンテナに光照射した状態で低周波電源(180kHz~15MHz)に接続したアンテナを近づけ、前置増幅器からの出力をスペクトルアナライザで観測したところ、電源の電圧振幅に比例してスペクトルピークの高さが変化するのが観察された。

スペクトルアナライザによる測定結果を図5に示す。戻り光が多いとき、実線のスペクトル(50.3GHzの電磁波照射あり)と点線のスペクトル(電磁波照射なし)とで差があることから、50.3GHzの電磁波照射により交流信号が発生していることがわかる。「4.」で後述するようにMLD-TDSによると光ビートのスペクトルピークは50.3GHzとその整数倍にある。また光ビートのスペクトル幅は約3GHz以上であるため、50.3GHzの電磁波との差周波電流のスペクトルは低周波から約1.5GHz以上にまで分布していると予測される。しかし観察さ

れたスペクトルは 30MHz 以下に限られている。これは前置増幅器や回路の帯域のためであると考えられる。図 5 では LD への戻り光が  $6900\mu\text{W}$  の場合はスペクトルの変化はほとんどない。これに対し、戻り光が  $330\mu\text{W}$  になるとスペクトルは急に減少し、 $250\mu\text{W}$  以下になると 50.3GHz の電磁波照射によるスペクトル成分がほとんどなくなっていることがわかる。一般に、LD は戻り光が多い場合にはマルチモード発振しやすく光ビートによる高速光強度変調が存在し、戻り光が少ない場合にはシングルモード発振しやすく高速光強度変調がなくなることが知られており、図 5 の結果もこのことを反映していると思われる。つまり、マルチモード発振のしきい値が戻り光  $330\mu\text{W}$  くらいにあり、これ以下の場合には光ビートによる高速光強度変調がなくなり、差周波信号が出なくなったのではないかとと思われる。

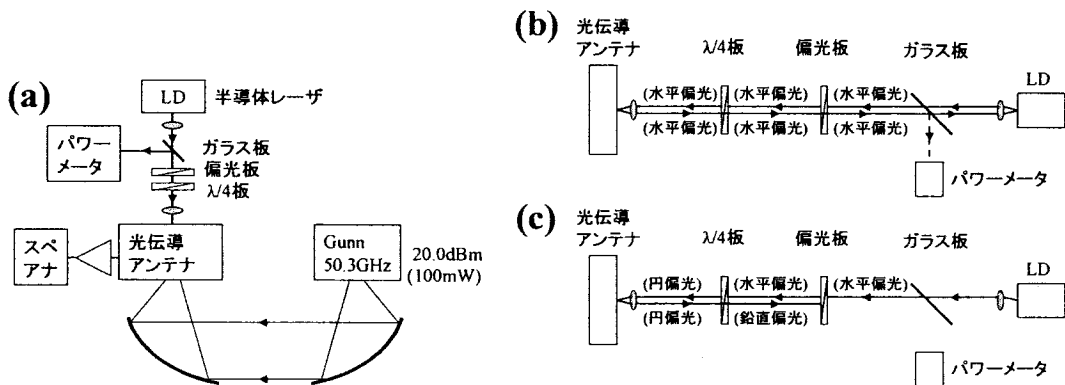


図 4 (a)ヘテロダイン信号の実験配置。(b) 戻り光最大となるよう  $\lambda/4$  板角度を調整したときの光源の様子。(c) 戻り光最小となるよう  $\lambda/4$  板角度を調整したときの光源の様子。

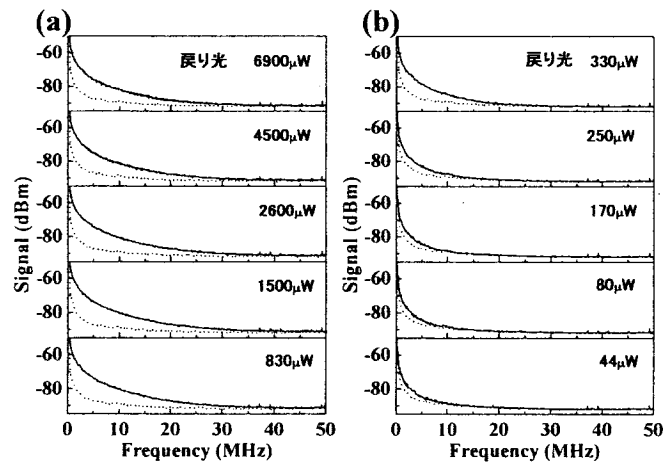


図 5 スペクトルの観測結果。実線は Gunn 発振器からの電磁波を入射したときの観測スペクトル、点線は電磁波を入射しないときの観測スペクトル。(a)LD への戻り光が大きい場合、(b)戻り光が小さい場合。

### 3-2. 交流信号強度の集光位置依存性

発生する交流信号の強度は光伝導アンテナ上の光集光位置に依存することが分かった。そこで、交流信号の強さが光伝導アンテナ上の集光位置にどのように依存するか確認した。

交流信号のモニターには周波数が 0~50kHz の低周波域に限られるものの信号の応答速度がスペクトルアナライザよりも速い FFT アナライザ(HP 35670A)を用いた。光伝導アンテナはプリアンプを介さずに直接 FFT アナライザに接続した。集光位置の確認のためには LD 光経路にガラス板を挿入し、スクリーンにうつる拡大反射像を観察した[図 6(a)]。ピンポイントに集光している場合、拡大反射像には輝点しかうつらないので、必要に応じてデフォーカスし、光伝導アンテナ上での位置を確認した。

その結果、図 6(b)の E、F に示すように電極パターンの尖端位置付近を照射すると交流信号が極大になっていることが分かった。ダイポール型の光伝導アンテナでは光伝導ギャップの電極パターンを尖った形状にし電圧印加して尖端付近をパルス光照射すると電磁波の放射効率が增大すること、逆に尖った電極パターンのアンテナを受信器として用いたときも検出効率が增大することが報告されている<sup>(13)</sup>。図 6(b)の E、F で信号が極大になるのもこのような効果が効いているものと推量される。

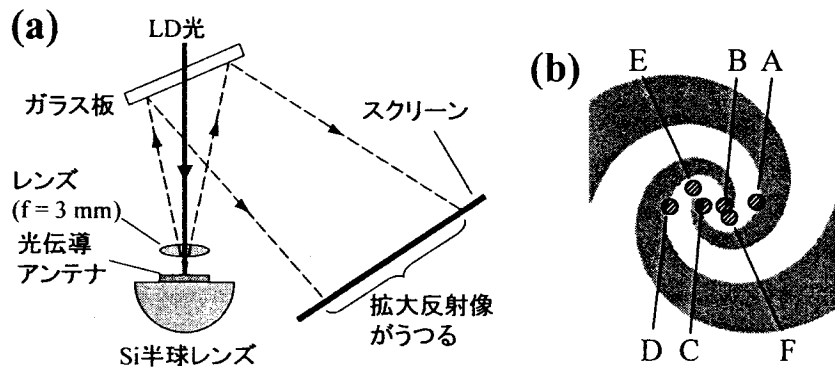


図 6 (a)集光位置を確かめるための配置。レンズの前にガラス板を挿入し、スクリーンに映る拡大像を観察した。(b)スパイラルアンテナの光伝導ギャップ付近での集光位置。灰色が金属薄膜電極を、白色が低温成長 GaAs 膜を示す。

#### 4. MLD-TDS による MLD の発振状態の確認

LD がマルチモード発振して光ビートが生じるための戻り光強度のしきい値が約 330 $\mu$ W であるのかをさらに確かめるために MLD-TDS 測定を行った<sup>(11)</sup>。実験配置を図 7 に示す。図 7 の LD 周辺の様子は図 4(a)よりも複雑ではあるが、図 4(a)と同じく  $\lambda/4$  板と偏光板により LD への戻り光を調整している。図 4(a)とは異なり、光伝導アンテナへの照射光偏光は一定である。しかし、光伝導アンテナへの照射光強度は  $\lambda/4$  板の角度により変化し、戻り光が大きいほど照射光強度は小さくなった。発振器側の光伝導アンテナへの照射光強度は 6.2~16.3mW、受信器側の光伝導アンテナへの照射光強度は 3.5~9.2mW であった。光源以外の部分は THz-TDS[図 1(c)]と同じである。すなわち電圧印加した光伝導アンテナを強度変調光で照射し電磁波を発生させ、反対側の光伝導アンテナで検出している。検出用光伝導アンテナから検出される直流電流は照射光強度と電磁波電場の積の時間平均値となっているので、時間遅延をずらすことによって生じる直流電流信号の変化(信号波形)は光強度と電磁波電場の相互相関である。電磁波が光強度変調から生じていることから、信号波形は光強度の自己相関に装置関数、つまりアンテナの応答が畳み込まれたものでもある。これをフーリエ変換することにより 50.3GHz とその整数倍にピークを持つスペクトルが得られた。ア

ンテナの応答はサブテラヘルツ域ではなだらかに変化しているので、光ビートのスペクトルは 50.3GHz とその整数倍にピークを持っていることが分かった。

図 8 に信号波形を示す。図 7 の配置では戻り光を変えるにしたがって光伝導アンテナ照射光強度が変化するので、図 8 では照射光強度による補正をかけている。信号強度は発信側アンテナ照射光強度と受信側アンテナ照射光強度に比例するので、これらの積で信号を除算した。戻り光が 22000~710 $\mu$ W では信号波形の形状はあまり変化しないのに対し、戻り光が 420~60 $\mu$ W では信号がほとんど消えてしまっている。つまり、戻り光の約 500 $\mu$ W 付近にしきい値があり、戻り光が弱いと光ビートがほとんど生じなくなっている。この戻り光しきい値(約 500 $\mu$ W)はスペクトルアナライザに生じた戻り光しきい値(約 330 $\mu$ W)からややずれている。しかし、2つの実験では光学素子の配置が変わっており、図 4(a)や図 7 のガラス板で反射されたビーム強度が同じでも 1 $\mu$ m $\times$ 3 $\mu$ m のレーザ出射口に帰る光強度は変わったであろうことを考えると必ずしも大きな差ではないと言える。よって、光ビート(図 8)の戻り光しきい値とスペクトルアナライザで検出した信号(図 5)の戻り光しきい値がほぼ同じことから、図 5 の信号は光ビートを起源とする差周波信号であると示唆される。

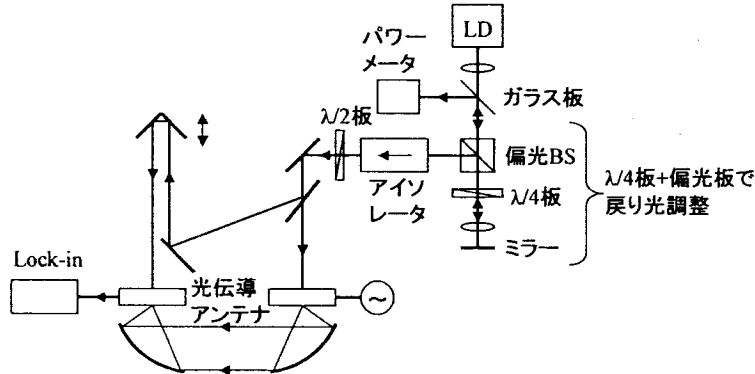


図 7 LD の発振状態を調べるための実験配置(MLD-TDS)。

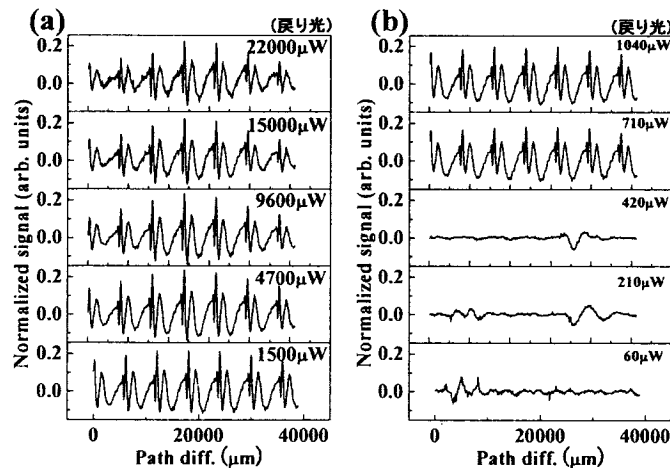


図 8 MLD-TDS 信号の様子

##### 5. Lock-in 検出器による直流信号の観測

ヘテロダイン信号の測定にはスペクトルアナライザなどによる交流信号測定のほか、ダ

イオードで整流して直流信号を測定する方法も考えられる。そこで、交流信号を直流に整流する以前には直流信号が生じてはいないかどうか確認を行った。図9のような配置を用いて信号観測を行った。Lock-in 検出器はチョッパの周波数で変調される信号成分を観測するのでこの配置は、チョッパがない場合の光伝導アンテナの直流電流を観測する配置である。前記「2.」の考察によると、光伝導アンテナに照射光とは独立の電磁波源からの電磁波を照射しても本来、直流電流は生じないはずである。しかし実験してみると信号が検出された。

この直流信号強度と電磁波強度との関係を見るため、図9のように電磁波経路にワイヤグリッド偏光子を用いて入射電磁波の強度を変化させた。ここで用いたワイヤグリッドの偏光度は99%以上であり、直交するように配置して電磁波を入射させたときの強度透過率は1%以下である。図9のGunn 発振器からは水平偏光の電磁波が放射されており1枚目のワイヤグリッド(WGP1)は水平偏光の電磁波を透過するように配置した。これにより確実に水平偏光の電磁波が2枚目のワイヤグリッド(WGP2)に入射するようにした。WGP2の角度はWGP1に対して0度~85度まで変化させることにより電磁波強度を変化させた。なお、WGP2の角度変化によりアンテナに入射する電磁波の偏光は変化するものの、スパイラルアンテナは円偏光特性を持っているため偏光角度の影響を受けない。また、信号強度のアンテナ上の集光位置依存性を調べた。これに加え、WGP1、WGP2を外してLDへの戻り光を変化させた場合の直流信号の変化も観察した。もしもこの信号がLD光の高速光変調を起源とするヘテロダイン信号ならば図5や図8のように戻り光500 $\mu$ Wの前後で信号値が急激に変化するものと期待される。

測定された照射電磁波強度と直流信号強度の関係を図10に示す。信号は振幅の2乗つまり電磁波強度にほぼ比例していることが分かる。また光伝導アンテナ上の集光位置を変えながら信号を観察した。図6のA~Dのように水平方向に集光位置をずらしていくと、A,B,C,Dの4箇所では信号の強さが極大になることが分かった。このうちA,Cへの集光では正の信号が出るのに対し、B,Dへの集光では負の信号が出るということが分かった。つまりどちらの電極の近くを照射するかによって信号の極性が決まることが分かった。このことからこの直流信号は非対称な分布をしている光生成キャリアの熱作用によって生じている可能性が示唆される。つまり、光生成キャリアが電磁波を吸収して温度が高くなり熱拡散する際に有効質量の違いから拡散距離に差ができ、電気2重層が形成されているのかもしれない。あるいは光生成キャリアの非対称な分布によって何らかの整流作用が生じ、50.3GHzの電磁波が整流されて直流信号が生じている可能性が考えられる。直流信号が最大となる集光位置は「3.」の交流信号が最大になる位置(EまたはF)からずれている。このことから直流信号と交流信号の起源が異なっていることが示唆される。

また、LDへの戻り光を変えた場合の直流信号の変化を図11(a)に示す。これによると戻り光500 $\mu$ Wの前後で信号値が急激に変化するという事は生じておらず、やはりこの信号はLDに含まれる高速光変調起源のものではないことが示されている。なお、戻り光が多くなるにしたがって光伝導アンテナを照射する光は弱くなっている。そこでアンテナ照射光強度を横軸にとってグラフを書いた[図11(b)]。図11(b)では信号強度が光照射強度にほぼ比例しているのが分かる。戻り光を横軸にとったグラフ[図11(a)]で戻り光が多くなるにしたがって信号が弱くなるのは、単に照射光強度が弱くなっているのが原因であることが分かる。



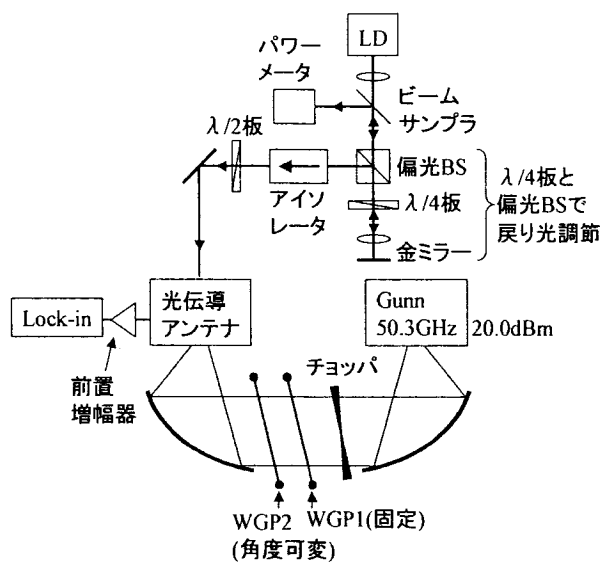


図9 実験配置図。 $\lambda/4$ 板はLDへの戻り光が1.02mWとなるような角度にしておいた。このとき光伝導アンテナへの照射光強度は23.5mWであった。

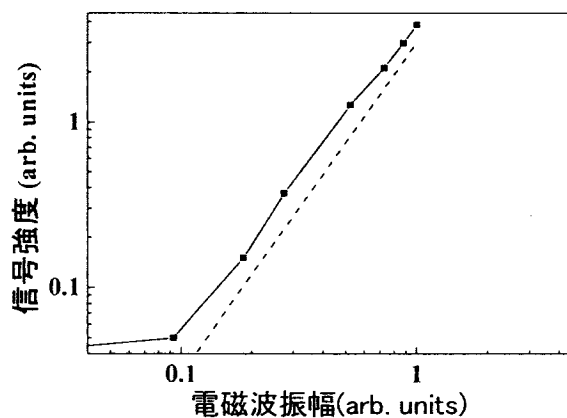


図10 電磁波振幅対信号強度の関係。破線は振幅の2乗に比例する曲線を示す。光伝導アンテナ上の集光位置は図6のAの位置とした。

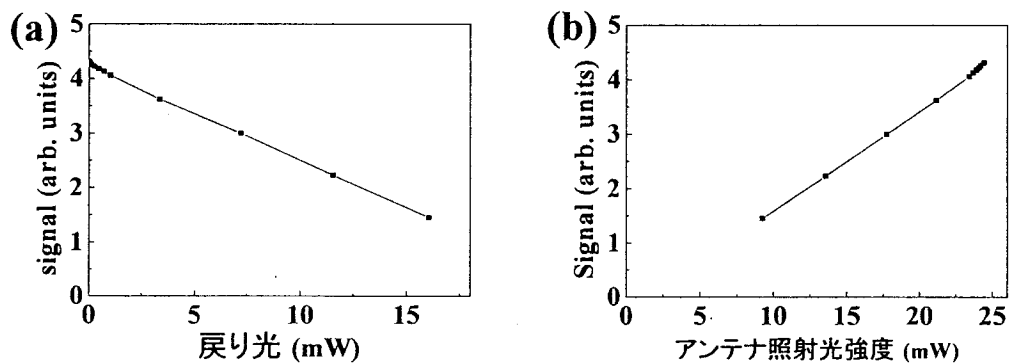


図11 (a)戻り光対直流信号強度の関係。(b)アンテナ照射光強度対直流信号強度の関係。

## 6. MLD-TDS による LD の発振状態の観察

LD の発振状態に関してはさまざまな調査がされている。例えば、文献(14),(15)によると LD 光を分光器で分光して各発振線の時間変化を調べることにより、LD の発振状態を調べている。これに対して MLD-TDS の信号からは LD が同時に複数のスペクトル線を出し、光ビートの存在している発振状態を調べることができる。

第 1 に、信号強度から光ビート強度について情報を得ることができる。例えば、図 8 に示すように、LD への戻り光の変化による光ビートの出現・消滅を容易に観察することができる。また、LD の駆動電流を変化させた場合の MLD-TDS 信号の変化を図 12(a)に示す。信号強度は図 8 と同様に光強度で補正している。信号形状はほぼ相似であるものの、駆動電流を弱くすると光強度の割には MLD-TDS 信号が強くなっていくことが分かる。これは電流が弱いとき、平均強度に対する光ビートによる強度変動振幅の割合が大きいことを示唆している。

第 2 に、MLD-TDS 信号のスペクトルから、光ビートのスペクトルピーク形状について情報を得ることができる。スパイラルアンテナの応答スペクトルはサブテラヘルツ域においてなだらかな形をしているので、MLD-TDS の信号波形のフーリエスペクトルが離散的なピークからなっているような場合にはピーク幅が光ビートスペクトルピークの幅をそのまま反映している。図 8 において、戻り光が  $500\mu\text{W}$  以上の光ビートが安定的に存在する条件での信号波形の様子を図 8 よりも広い区間の信号について図 12(b)に示す。図 12(b)は相似形状の繰り返しになっているのでそのスペクトルは離散的なピークからなっている。各スペクトルピークの幅は図 12(b)の点線で示す包絡線の幅に反比例する。戻り光を  $20\text{mW}$  から  $0.65\text{mW}$  まで変化させるに従い包絡線の幅は約  $33000\mu\text{m}$  から約  $100000\mu\text{m}$  と約 3 倍程度変化し、光ビートスペクトル幅が約  $8\text{GHz}$  から約  $3\text{GHz}$  まで変化していることに対応している。

文献(14),(15)によると戻り光の少ない条件でもマルチモード発振している LD の場合、複数の発振線が入れ替わるようにして発振し同時に光っている発振線はひとつしかないという状態が報告されている。つまり分光器でスペクトルの時間平均を観察すればマルチモードスペクトルであるものの、光ビートは存在しない状態である。文献(14),(15)では LD 光を分光器で分光して各発振線の時間変化を調べていたが、分光器と MLD-TDS を組み合わせれば比較的簡単な実験配置で「同時発振するスペクトル線が 1 つか、複数か」の情報を得ることができると思われる。

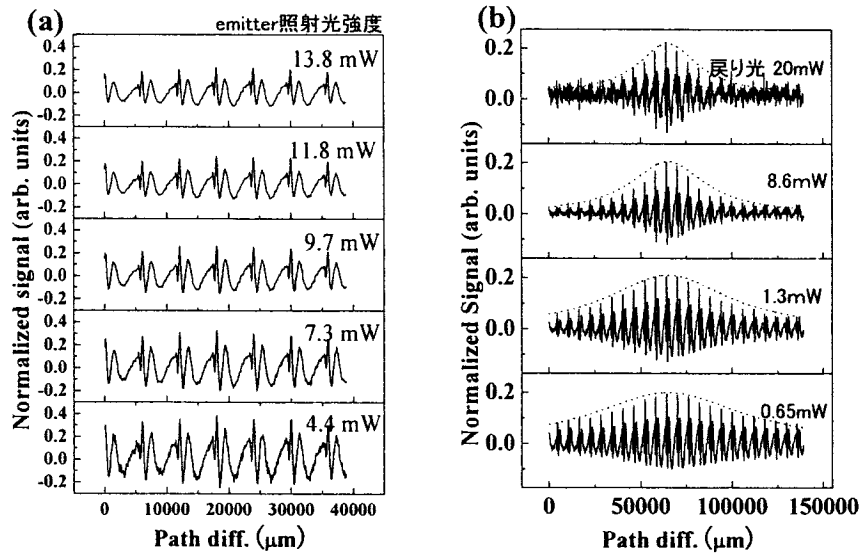


図 12 (a)LD 駆動電流を変えたときの信号の様子。(b)戻り光強度を変えたときの MLD-TDS 信号の様子。  
図 8 よりも信号の区間幅を大きく取っている。(a),(b)いずれとも光伝導アンテナ照射強度で補正した信号を示している。

## 7. おわりに

このように、観測される信号は「3.」で述べた、LD への戻り光によって変化する交流信号と「5.」で述べた、熱作用もしくは整流作用によるらしい直流信号とが重なって生じていることが分かった。このうち、交流信号の方が所期のヘテロダイン信号であると思われる。ヘテロダイン信号については、現在のままでは光照射している LD の光ビートスペクトル幅が約 3GHz 以上もあるため、生じる差周波信号のスペクトルも DC から約 1.5GHz 以上にまで広がっており、検出帯域を大きく越えている。つまり信号の大部分を捨てていると思われるので、光ビートのスペクトルの狭線化や検出回路の広い帯域化が今後必要である。今回の実験では 50.3GHz の検出にとどまったが、原理的には更に高周波の電磁波検出も期待できる。将来的には冷却動作が不要なサブテラヘルツ帯検出器としてイメージングやレーダ、短距離通信などの用途の検出器として応用できる可能性がある。

また、MLD-TDS を用いて LD 光の光ビートによる高速変調の駆動電流による変化や戻り光による光ビートスペクトル幅の変化などが観察された。このことは MLD-TDS が LD の発振状態のプロブとして用いられる可能性を示唆している。

## 謝辞

財団法人テレコム先端技術研究支援センターの研究助成に感謝します。また、実験上の助力を頂きました海上保安大学校海事工学講座の岩永講師、倉重教授、倉本教授に感謝します。

## 参考文献：

- (1) A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, K. Kawase, Appl. Opt. **43**, 5637 (2004).

- (2) N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K.-I Lin, J-S Hwang, J Xu, X. -C. Zhang, Appl. Phys. Lett. **86**, 054105 (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) 萩行正憲、谷正彦、長島健, 応用物理 **74**, 709 (2005).
- (5) 王鎮, 応用物理 **75**, 218(2006).
- (6) J. J. A. Baselmans, M. Hajenius, J. R. Gao, A. Baryshev, J. Kooi, T. M. Klapwijk, B. Voronov, P. de Korte, and G. Gol'tsman, IEEE Trans. Appl. Supercond. **15**, 484 (2005).
- (7) T.Suzuki, T. Yasui, H. Fujishima, T. Nozokido, M. Araki, O. Boric-Lubecke, V.M. Lubecke, H. Warashina, and K. Mizuno, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **MTT-47**, 1649 (1999).
- (8) 阪井清美、谷正彦, 応用物理 **70**, 149 (2001).
- (9) 永井正也、田中耕一郎, 応用物理 **75**, 179 (2006).
- (10) M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and M. Hangyo, IEEE Microwave Guid. Wave Lett. **7**, 282 (1997).
- (11) O. Morikawa, M. Tonouchi, and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett. **76**, 1519 (2000).
- (12) K. A. McIntosh, E. R. Brown, K. B. Nichols, O.B. McMahon, W. F. DiNatale, and T. M. Lyszczarz, Appl. Phys. Lett. **69**, 3632 (1996).
- (13) Y. Cai, I. Brener, J. Lopata, J. Wynn, L. Pfeiffer, and J. Federici, Appl. Phys. Lett. **71**, 2076 (1997).
- (14) A. M. Yacomotti, L. Furfaro, X. Hachair, F. Pedaci, M. Giudici, J. Tredicce, J. Javaloyes, S. Balle, E. A. Viktorov and Paul Mandel, Phys. Rev. **A69**, 053816 (2004).
- (15) L. Furfaro, F. Pedaci, M. Giudici, X. Hachair, J. Tredicce, and S. Balle, IEEE J. Quantum Electron. **40**, 1365 (2004).