

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月12日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560047

研究課題名（和文） 光伝導素子を用いたテラヘルツ波キャリアの光学的抽出技術の研究

研究課題名（英文） Study on optical extraction technique of terahertz-wave carrier using photo-conducting device

研究代表者

兵頭 政春（HYODO MASAHARU）

独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所企画室・専門推進員

研究者番号：30359088

研究成果の概要（和文）： 2台の半導体レーザーと近赤外光用の光伝導素子を用いてテラヘルツ波の光学的抽出技術の実証に向けた研究を実施した。92 GHzでの電磁波発生実験の結果を基に光伝導素子のミキシング特性を予想し、光伝導素子の共振周波数に近い約340 GHzでホモダイン及び自己ヘテロダイン構成によるテラヘルツ波の検出実験を実施した。キャリア抽出に必要な望ましい信号は検出できなかったものの、変換損失の低減や光伝導素子のインピーダンス整合条件の改善によって大幅な改善が可能である見通しを得た。

研究成果の概要（英文）： The study on optical extraction technique of terahertz-wave carrier by using a pair of semiconductor lasers and photoconductive devices for near-infrared light was carried out. The expected characteristics were predicted on the basis of the experiment carried out at 92 GHz. Homodyne and self-heterodyne configurations were implemented to detect faint terahertz signals around 340 GHz. Although the desired signal was not detected, it might become possible to detect it by further improving the conversion losses as well as radiation impedance-matching conditions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード： 光源技術、テラヘルツ／赤外材料・素子、先端の通信

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波をキャリアとして利用する将来の無線通信システムでは、テラヘルツ波はレーザー光のビート波として基地局から送出されて光ファイバー中を伝送され、遠方に設置された光-テラヘルツ波変換器によってテラヘルツ波に変換されてアンテナか

ら端末へ向けて送出されることになる。移動体端末がこのテラヘルツ波を送受信する場合は、受信されたテラヘルツ波からキャリアを安定に抽出・再生する技術が不可欠となる。

受信された信号からキャリアを抽出するためにはヘテロダイン技術が欠かせない。テラヘルツ帯のミキサーとしては、従来からウィスカーや超伝導ミキサーが知られている

が、ウィスカーは機械的安定性に乏しく、超伝導ミキサーは液体ヘリウム等による冷却が不可欠であり、いずれも携帯端末に組み込むことが難しい。一方、常温で動作する微小なテラヘルツ波の送受信器として光伝導素子が知られているが、近年、この光伝導素子に超短パルス光を重畳して照射することにより、テラヘルツ波とのミキシング動作が可能であることが示された[1]。連続波 (CW) 的な光での動作報告はないが、ビート波とテラヘルツ波の周波数が接近していれば、原理的には通常ホモダイン法と同等の強度のミキシング出力が中間周波出力として得られることが期待できる。

本研究課題では、パルス光の代わりに高安定な CW レーザー光によるビート波を用い、光伝導素子による光波とテラヘルツ波のミキシング動作の実証に向けた研究を実施した。これまでに光伝導素子に CW のビート波を重畳照射してテラヘルツ波のヘテロダイン出力を得た報告は無く、キャリア抽出に成功した例もないことから、本研究が実施される学術的価値は極めて大きいと言える。

光伝導素子がテラヘルツ波の高感度なヘテロダイン変換器として利用可能であることが実証されれば、従来のウィスカーや超伝導ミキサーに代わり、常温で動作して携帯端末にも組み込めるような小型のテラヘルツ波ミキサーの実現につながることを期待されるほか、比較的大きなテラヘルツ波出力が得られる量子カスケードレーザー等の発振周波数を精密に負帰還制御する手段としての発展も期待され、移動体端末間でのテラヘルツ波利用技術の開発を大きく促進させる意義がある。

[1] S. Yokoyama *et al.*, *Opt. Exp.* **16**, 13052 (2008).

## 2. 研究の目的

テラヘルツ波をワイヤレス通信に積極的に利用しようとする場合、移動体端末においては、受信された電磁波からキャリア成分を抽出する技術が不可欠となるが、テラヘルツ帯においてこれに相当する技術はまだ開発されていない。

本研究課題では、光伝導素子のミキシング機能を積極的に利用することにより、テラヘルツ波からキャリア成分を光学的に抽出する技術を開発し、テラヘルツ波利用通信の早期実現へ寄与することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究課題で使用した光伝導素子 (PCA-90-01-10-800、BATOP 社製) は、光伝

導薄膜上に共振周波数が約 400 GHz のボータイ型アンテナが形成されており、間隙部の電極は櫛の歯状に加工されている。間隙部にレーザー光を照射することにより、寿命が極めて短い (~300 fs) 光キャリアが励起され、光が照射されている間だけ間隙部の電気抵抗が低下する。アンテナの両極に直流バイアス電圧を印加しておくこと、印加された電場によって光キャリアが加速・制動を繰り返し、テラヘルツ波を発生させる。CW 光を照射した場合、光キャリアはランダムに生成消滅を繰り返すだけなのでコヒーレントな放射は得られないが、一定の周波数で点滅するビート光を照射した場合は、点滅に同期してキャリアが増減速されるため、点滅の周波数と同じ周波数のコヒーレントな電磁波を放射させることができる。

光伝導素子をミキサーとして使用する場合はバイアス電圧を印加せずに使用する。アンテナにテラヘルツ波が入射するとアンテナには交流起電力が発生するが、間隙部にビート光を照射することによってアンテナに流れる電流をスイッチングすることができる。この結果、テラヘルツ波とビート波の積の演算、すなわちミキシング動作が行われ、間隙部には中間周波数の交流電流が流れる。この電流を増幅してレーザーの一方に負帰還制御をかけることができれば、テラヘルツ波のキャリア成分が光波のビート信号にコヒーレントに変換され、キャリア抽出動作が実現される。

光伝導素子の高周波特性は図 1 に示す簡略化された等価回路で表現することができる。送信器として使用する場合、間隙部に光を照射することによって間隙部の抵抗が低下し、電流が増加する。この増加分が光電流であり、観測されるのは直流成分 (変動成分の平均値) としてであるが、光キャリアは 350 GHz 程度のビート周波数に対してほぼ完全に追従できるものと考えられるため、この光電流の実効値とバイアス電圧値から、光照射時に間隙部で消費される高周波電力  $P_g$  を見積もることができる。間隙部の高周波インピーダンスを  $Z_g$ 、アンテナの放射インピーダンスを  $Z_c$  とすれば、アンテナから放射される高周波電力  $P_c$  は近似的に  $P_g(Z_c/Z_g)$  に等しいと考えられる。

光伝導素子をミキサーとして使用する場

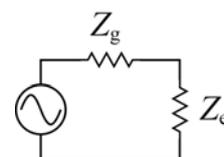


図 1. 光伝導素子の簡略化された等価回路。  $Z_g$ : 間隙部の高周波インピーダンス;  $Z_c$ : 放射インピーダンス。

場合も、基本的な特性は図1の等価回路で表現することができる。放射インピーダンスが $Z_c$ のアンテナで受信された高周波電力 $P_c$ は放射インピーダンス $Z_c$ と間隙部インピーダンス $Z_g$ に分配され、 $Z_g$ に分配された高周波電力 $P_g$ がビート光照射によってスイッチングされて中間周波電力 $P_{IF}$ に変換される。 $P_{IF}$ はさらに $Z_g$ 及び計測系の特性インピーダンス $Z_0$ とに分配されて中間周波出力 $P_{out}$ として観測される。エミッターとミキサーに特性の等しい光伝導素子を使用した場合、 $Z_g \gg Z_c$ なので、

$$P_c \cong \gamma P_g (Z_c/Z_g) \quad (1)$$

$$P_{out} \cong \gamma P_c (2Z_c Z_0/Z_g^2) \quad (2)$$

と近似できる。ただし、インピーダンス不整合に起因するもの以外の変換効率をまとめて $\gamma$ とした。 $\gamma$ には、共振周波数の不一致、表皮効果や誘電体による損失、漏洩電流による損失、アンテナの放射指向性、シリコンレンズの開口数及び収差による損失、レンズや空気での吸収や界面での反射などが含まれる。

図2に、高調波ミキサを使用して電磁波のパワー $P_c$ を計測するための実験装置の構成を示す。光伝導素子の励起には波長780 nmの2台のSacher社製外部共振器型半導体レーザーを用いた。レーザーの出力光は偏波保持ファイバーに導入されており、ファイバー端でそれぞれ約37 mWのCW単一モード出力が得られる。2台のレーザーにマウントされたピエゾ素子の電圧を制御することにより、差周波数を0 Hzから340 GHzまでの任意の値に設定することができる。前述の2台の半導体レーザーの出力光を偏波状態を揃えてビームスプリッターで混合し、13mWの出力光を光伝導素子に照射した。バイアス電圧は4.5 Vとした。光伝導素子から放射される電磁波はシリコンレンズでコリメートされており、Wバンド高調波ミキサ(hp11970W)で受信し、スペクトラムアナライザ(hp8565E)で計測した。

次に、中間周波出力 $P_{out}$ を計測するための自己ヘテロダイン実験装置の構成を図3に示す。

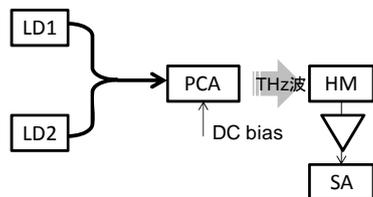


図2. 放射パワー計測実験装置の構成。LDは半導体レーザー、PCAは光伝導素子、HMは高調波ミキサー、SAはスペクトラムアナライザ。

す。2台のレーザーからの出力光は3つのビームスプリッターと1台のAOMを用いて分岐・混合されており、AOMによって1次光に50 MHzの周波数シフトを与えている。出力光をエミッター、ミキサーそれぞれの光伝導素子に導入することにより、中間周波出力として50 MHzの復調信号が得られることになる。

なお、測定系はAOMからの強力なEMIを受け、計測信号が攪乱される。これを避けるため、AOMを含む光学系と光伝導素子は異なる部屋に設置し、励起光は光ファイバーで実験室間を伝送した。さらに、光伝導素子の信号ケーブルを二重シールドとし、外側のシールドのみをボディの金属体と結合した。EMI対策前後の中間周波出力のスペクトルを図4に示す。この対策により、50 MHzのEMIがほぼ完全に除去され、増幅器雑音限界の-148 dBm (RBW = 1 kHzの場合)を下限とする微弱信号計測が可能となった。

#### 4. 研究成果

図5に使用した光伝導素子の印加電圧対出力電流の測定結果を示す。平均パワー9.3 mWのCW光を入射して計測した。全電圧範囲で光電流成分は印加電圧に対して単調に増加

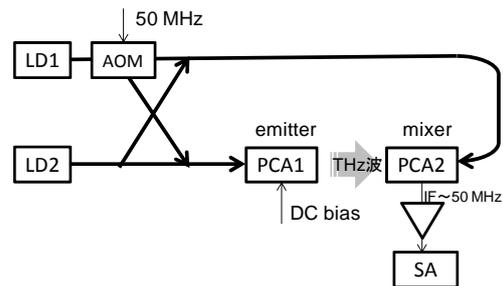


図3. 自己ヘテロダイン方式による340 GHzのテラヘルツ波検出実験装置の構成。AOMは音響光学変調器、他は図2と同じ。

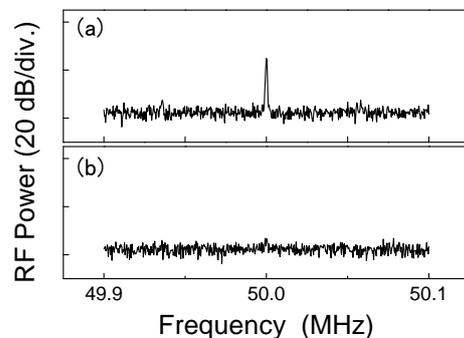


図4. EMI対策実施前(a)と実施後(b)の中間周波出力のスペクトル (RBW: 1 kHz)。

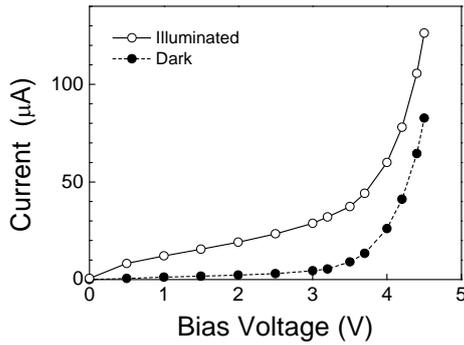


図5. 使用した光伝導素子の電圧対電流特性の測定結果。

しており、この計測結果から、バイアス電圧 4.5 V 印加時の光伝導素子の照射時の高周波光電流の実効値を 28  $\mu\text{A}$ 、高周波インピーダンス  $Z_g$  を 100  $\text{k}\Omega$ 、間隙部で消費されている高周波電力  $P_g$  を 126  $\mu\text{W}$  と見積もった。さらに、ポータアンテナの放射インピーダンスを 73  $\Omega$ 、変換効率  $\gamma$  を 0.1 程度と仮定し、(1)式により、放射される高周波電力を 10  $\text{nW}$  と見積もった。

実際に図 2 の装置で計測された 92 GHz の電磁波のパワーは、検出限界値 (約 2.5  $\text{nW}$ ) 以下であった。予想と異なった理由は、使用した光伝導素子の共振周波数が約 400 GHz であるため素子の共振条件が満たされないことが主な原因であると判断した。

この実験結果を基に光伝導素子の 340 GHz でのミキシング特性を予想し、(2)式に従って中間周波出力として得られる自己ヘテロダイン信号の大きさを見積もったところ、最大で -121  $\text{dBm}$  程度の信号強度が得られる見通しを得た。この信号強度は中間周波の帯域を 1  $\text{kHz}$  程度に制限すれば十分な信号対雑音比で観測可能な大きさである。

そこで、図 3 の装置を用いて自己ヘテロダイン実験を実施した。励起に用いたレーザー光のスペクトルを図 6 に示す。2 つのレーザー光はほぼ等しいパワーで約 340 GHz の差周波数を隔てて単一モード発振している様子がわかる。2 つの光伝導素子に入射する光パワーを 8.7  $\text{mW}$ 、6.0  $\text{mW}$  とした。

注意深くアライメントを行い、最適な動作条件下で実験を繰り返したが、最終的に有意な信号は検出されず、パワーは検出限界の -148  $\text{dBm}$  以下であった。AOM を使用せずにホモダイン配置としてロックインアンプを用いた計測も試みたが、やはり有意な信号は検出されず、信号パワーは 10  $\text{nV}$  (-147  $\text{dBm}$ ) 以下であることが再確認された。

信号は想定値よりも少なくとも 26  $\text{dB}$  以上も小さく、現時点でその主原因は明らかではないが、インピーダンス不整合に起因するもの以外の損失が想定以上に大きいことが示

唆された。それでも熱雑音の -174  $\text{dBm/Hz}$  よりは十分に大きいと考えられるため、高感度な RF ロックインアンプや高感度ボロメータを使用することで検出できる可能性がある。

今後さらにキャリア抽出動作を実証するためには、帯域幅が 1  $\text{MHz}$  程度でも十分な強度の信号が得られる必要があり、中間周波信号の大幅な増強が必要である。このためには、損失の改善とともにインピーダンス不整合の改善が不可欠であり、テラヘルツ波源として QCL の利用や、インピーダンス整合を取りやすい超伝導ミキサーとの比較検討も実施する必要があるものと考えられる。

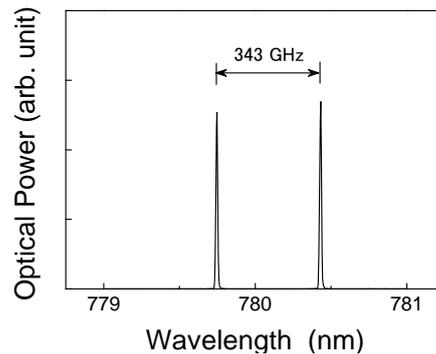


図6. 励起光のスペクトル。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 齋藤伸吾、THz 帯量子カスケードレーザーのパルス光入射による強度変調 II、応用物理学会、平成 23 年 8 月 31 日、山形大学、山形県。
- ② 齋藤伸吾、THz 帯量子カスケードレーザーのパルス光入射による強度変調、応用物理学会、平成 22 年 10 月 17 日、長崎大学、長崎県。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

兵頭 政春 (HYODO MASAHARU)  
 独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所企画室・専門推進員  
 研究者番号：30359088

### (2) 研究分担者

齋藤 伸吾 (SAITO SHINGO)  
 独立行政法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所超高周波 ICT 研究室・主任研究員

研究者番号：80272532

(平成22年4月～平成24年1月 研究に  
参画)

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号：