2013/11/19 後期雑誌会
B4 小倉　隆志

Improved sensitivity of terahertz detection by GaAs photoconductive antennas excited at 1560 nm

低温成長 GaAs 光伝導アンテナの 1.5μm 帯光励起における感度改善

1. イントロダクション

近年，THz 時間領域分光法や THz コム参照型スペクトラム・アナライザーといった THz 帯の分光分析において, 波長 1.5μm 帯のモード同期ファイバーレーザーが広く用いられている．しかし，現在の装置では自由空間において，非線形光学結晶により, レーザー出力を 800nm 帯に波長変換している. これは 1.5μm 光によって直接励起可能な THz 発生・検出素子が不足していることが原因である．このままでは，ファイバーレーザーを用いるメリットを最大限活用できていない．したがって，1.5μm 光で直接励起可能な THz 発生・検出素子の開発が強く求められている．

この問題を解決する手段として，第一に 1.5μm 光に対応したバンドギャップエネルギーを持つ低温成長 InGaAs 光伝導アンテナの開発が進んでいる．しかし，抵抗率が小さく暗電流が発生し検出 SN 比が．第二に従来用いている GaAs 光伝導アンテナを 1.5μm 光励起で用いることが挙げられる．

本雑誌会では，GaAsPCA を用いたオールファイバー型 THz スペアナを開発するために，1.5μm 光励起による GaAsPCA の感度を向上した例を紹介する．

2. Improved sensitivity of terahertz detection by GaAs photoconductive antennas excited at 1560 nm [1]

本論文では, 1560μm 光で励起した低温成長 GaAs 光伝導アンテナによる THz 波検出について再検討している．通常，1.5μm 帯光で直接励起可能である低温成長 InGaAs 光伝導アンテナを，THz 波のエミッター及び検出器に用いる．しかし，低温成長 InGaAs 薄膜の抵抗率はおよそ1kΩcmである[2].これは低温成長 GaAs 薄膜の抵抗率$10^{6\sim7}$Ωcmに比べ 3~4 桁程小さく，高いノイズレベルを引き起こし検出 SN 比が悪くなる．一方，1.5μm 帯光で励起した低温成長 GaAs 光伝導アンテナによる THz 波検出もまた報告されている[3]．しかし，この方法は 780μm 光励起に比べ信号振幅が 1 桁小さいため，実際の THz 時間領域分光法(THz-TDS)に用いられていない．

そこで，本論文では参考文献[3]他一般的に用いられているダイポール型 PCA のギャップ長さを短くし，励起光を密に集光することにより 10 倍検出感度を向上したことを報告している，また，低温成長 GaAsPCA が低ノイズであることから，入射パワー9.5mW で，50dB より高い SN 比が得られたことを報告している．

3.　セットアップ

4.1 光伝導アンテナ

実験で用いたダイポール型 PCA は，GaAs 基板上に成長させた厚さ 2μm の LTG-GaAs 上に作成した．作成方法は従来のフォトリソグラフィーとリフトオフテクニックを用いる．ダイポールは図 1(a)に示すように，テラヘルツ電界誘起光電流が通るコプレーナストリップラインに組み込まれている．

本論文では, ギャップ長さ L_G とギャップ幅 W_G を変化させ実験を行っている．ギャップ長さを 1.5μm，3.0μm，5.0μm，10μm とし，ギャップ幅はギャップ長さと等しくした．ただし，ギャップ長さ 1.5μm の時のみ，ギャップ幅を 2μm としている．

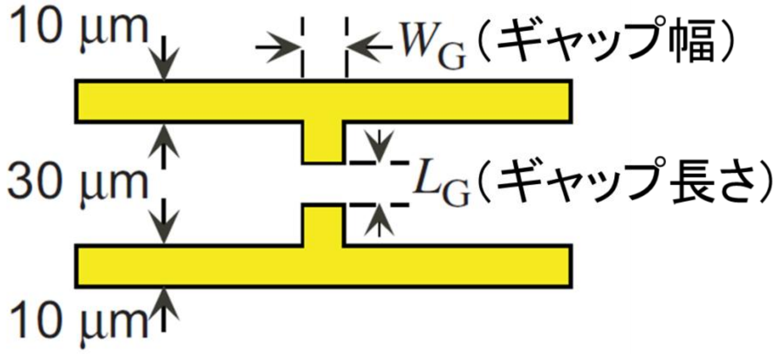


図 1　PCA 概略図

4.2 THz-TDS

PCA による THz 波検出は，標準的な時間領域分光法(THz-TDS)による．図 2 に THz-TDS のセットアップを示す．モードロックファイバーレーザー(IMRA B-200，中心波長 1560nm，繰り返し周波数 50MHz，パルス幅約 60fs)を BS によってポンプ光とプローブ光に分ける．ポンプ光は非線形光学結晶である $LiNbO_3$(ニオブ酸リチウム)に入射し，非線形光学効果によって第 2 高調波（波長 780nm）を発生させる．波長変換された後，光チョッパーで強度変調され，LTG GaAsPCA のギャップ間に集光する．PCA のギャップ間にバイアス電圧(30V)をかけた状態で，フェムト秒パルスが入射すると，光励起キャリアによりアンテナ間に瞬時電流が流れる. その結果, 双極子放射によりアンテナから THz 領域にスペクトルを持つ電磁波パルスが発生する．発生した THz 光はレンズにより，検出側の PCA に集光される．それと同時に，検出用プローブ光を発生側と同様にアンテナのギャップ間に集光すると，THz 光の電場に比例する電流がアンテナ間に流れるので，THz 光の振幅の大きさ測ることができる．この時，ロックインアンプの時定数は 10ms，THz 光の経路は空気パージしていない．

発生側の PCA はアンテナ長 50μm，ギャップ幅 5μm，ギャップ長さ 10μm，

検出側の PCA は図 1 に示したようにギャップ幅とギャップ長さを変化させている．さらに，励起光直径 DS を変化させるため，いくつかの顕微鏡対物レンズを用いている．そのため，最小のスポットサイズをサイフエッジ法によって測定した．以下に示されるスポット径 Ds は焦点における 1/e 直径である．

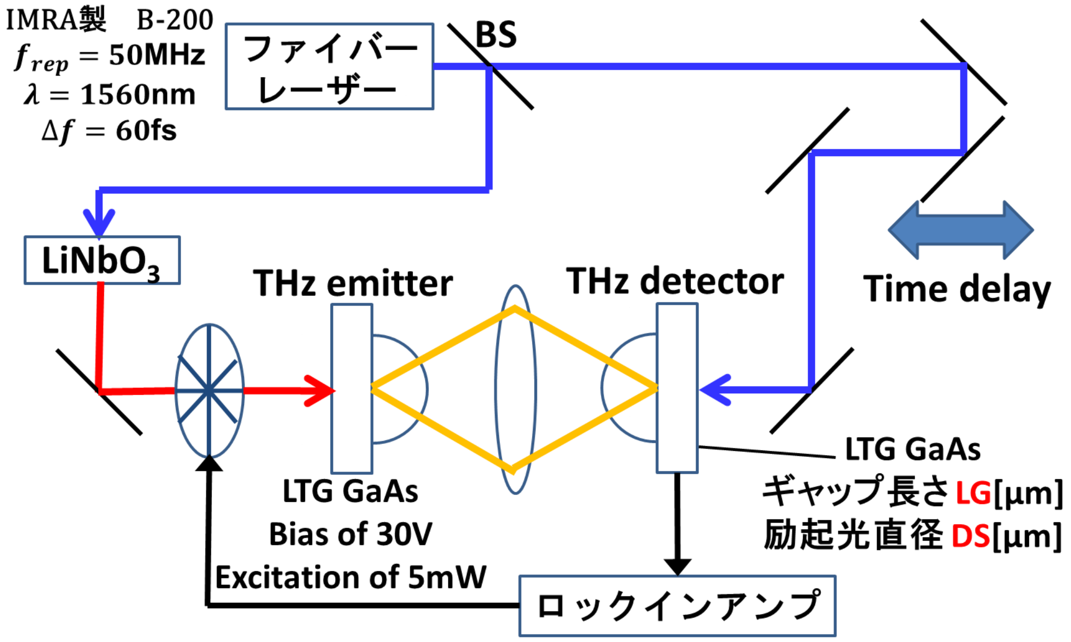


図 2　実験装置

4.　実験結果

5.1 時間波形と振幅スペクトル

図 3 に THz-TDS により取得した時間領域波形を示す．検出器の励起パワー 9.5mW とし，LG/DS を 5/5.4，3/3.3，1.5/2.7 と変化させている．図 3 より小さい DS と短い LG の組み合わせの使用が，信号振幅の大幅な向上をもたらすことは明らかである．特に LG/DS=1.5/2.7 の組み合わせの場合，最大振幅は 5nA に達し，これは 780nm 励起で得られる最大振幅と同じオーダーである．

さらに，図 4 に振幅スペクトルのノイズスペクトルを示す．LG/DS=1.5/2.7 の組み合わせで得られた 1THz 周りのピーク振幅は，LG/DS=5.0/5.4 の場合に比べ，スペクトル幅の低下を除けば 10 倍に高くなる．図 4 において点線は，THz 波なしで得た検出システムのノイズスペクトルを表す．後で示すように，本論文で調査された範囲では，ノイズレベルは励起パワー，ギャップ長さ，スポット径に依存しない．LG/DS=5.0/5.4 の場合，テラヘルツスペクトルは 3THz 周りでノイズレベルに落ちる．一方，LG/DS=1.5/2.7 の場合，高周波領域のノイズレベルが押し上げられている．これは，過剰なノイズの存在を示す。結果と

して peak-to-noise 比は，スポット径とギャップ長さを短くしても変わらない．とは言っても，LG/DS=1.5/.2.7 の場合に，ロックインアンプの時定数 10ms で SN 比 50dB は良い値である．高周波での過剰ノイズの原因は現時点で明らかでないが．焦点で励起する場合，PCA 上のプローブビームのスポット位置が重要になってくる．したがって，商用システムのように光学系をしっかりと固定し，セットアップを小型化することで可能なノイズを削減することが可能だと本論文で述べられている．

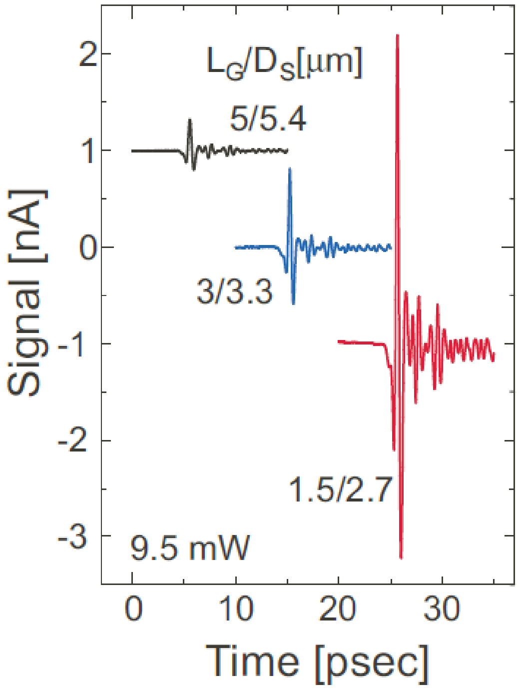


図 3　時間波形

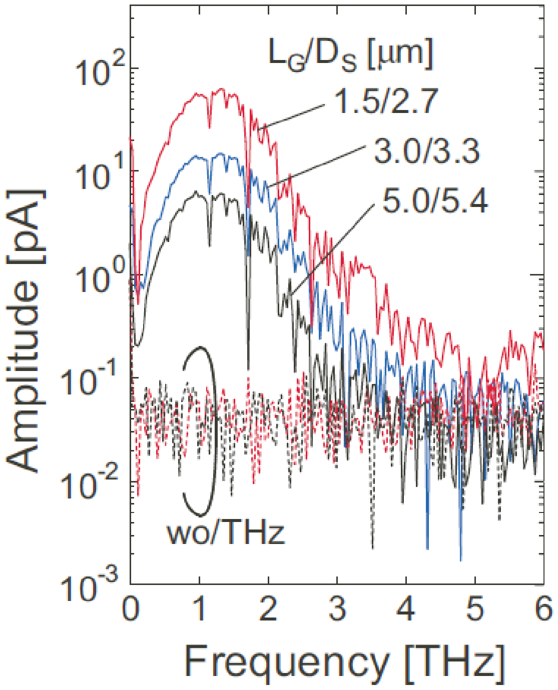


図 4　振幅スペクトルとノイズスペクトル

5.2　最大振幅のスポット径依存性

図 5 に THz-TDS の最大振幅とスポット径依存性を示す．図中の数字は検出 PCA のギャップ長をしめす．図 5 では図 3 で行っていない DS と LG の組み合わせについても実験を行っている．図 6 からはスポット径を小さくすることで，最大振幅が高まっていることがわかる．さらに，LG=1.5μm に対して，DS=2.1μm の場合より，DS=2.7μm の場合の方が信号振幅が高い．よって，ギャップ長とスポット径の組み合わせは適切に選ぶべきである．

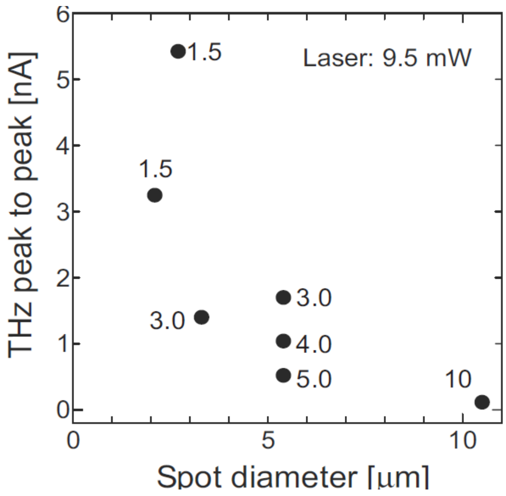
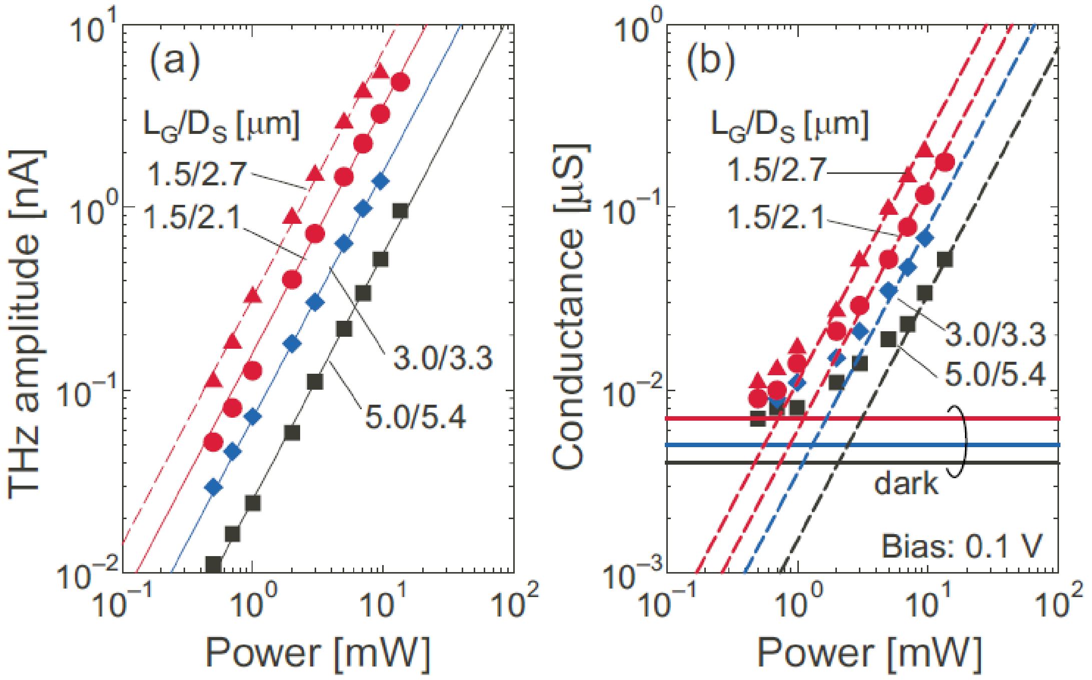


図 5　最大振幅のスポット径依存性

4.3　時間領域波形における最大振幅とコンダクタンスの励起パワー依存性

図 5 に入射パワー依存性についての実験結果を示す. (a)では時間領域波形における最大振幅との関係を測定し，(b)ではバイアス 0.1V を PCA に加えフォトコンダクタンス（抵抗の逆数）を測定している．図 6 の直線は傾き 1.35 であり，入射パワーの 1.35 乗に応じて信号振幅とフォトコンダクタンスが増加している．傾きが 1 でないため，本実験におけるテラヘルツ検出の原理は非線形な応答であることを示す．また，傾きが 2 より小さい値であることは，光励起プロセスが純粋な 2 光子吸収ではなく，過剰な As 原子によって形成された中間ギャップの励起が関わっていると言える．



(a)　時間領域における最大振幅　　(b) コンダクタンス(バイアス 0.1V)

図 5　入射パワー依存性

4.4　検出 PCA の入射パワーとノイズの関係

図 6 に，テラヘルツ波を放射しない場合の，検出 PCA におけるスペクトラルノイズ振幅の平均値を示す. これは図 4 点線部と同様に LG と DS の様々な組み合わせについて測定している．図 6 より，ノイズレベルは励起光パワー，ギャップ長さ，スポット径に依存していないことがわかる．さらに，ノイズの値は図中の破線で示したアンプノイズととても近く，検出システムのノイズはアンプノイズが支配的であることがわかる．このことは，光伝導材料に LTG GaAs を用いる大きなメリットである．

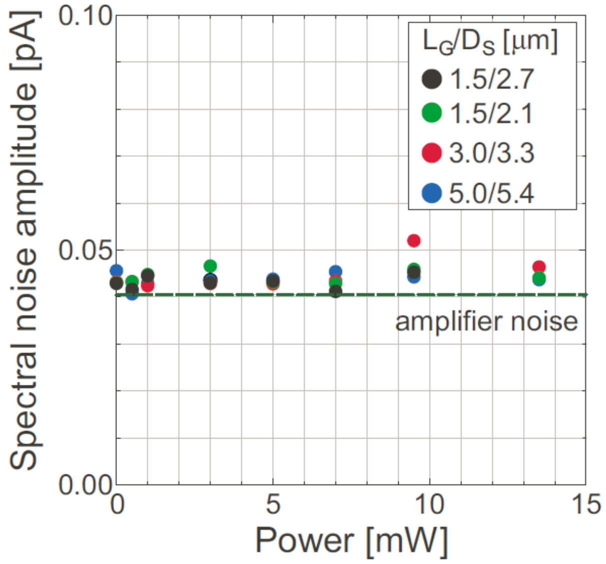


図 6 検出器ノイズの入射パワー依存性

5. まとめ

本論文では LTG GaAsPCA のスポット径とギャップ長を適切に変更することによって，780μm 光励起でも感度を改善することに成功した．結果として，入射パワー9.5mW で peak-to-noise 比 50dB 以上の信号を得た．さらに，入射パワーの増加による PCA のノイズは増加しないことがわかった．ノイズはアンプノイズが支配的であり，PCA ノイズはごく僅かである．したがって、実際の THz-TDS に 1.5μm 帯光励起 LT-GaAs-PCA が適用可能であることを示唆している．また，LTG GaAsPCA に 780μm 光を入射した場合のフォトキャリア生成過程について明らかにした．低パワー領域では中間準位から線形に励起している．パワーが上がるにつれ，中間順位の励起は飽和していく．さらにパワーを上げると，入射パワーの 2 乗に比例するようになり 2 光子吸収による励起であることがわかった．

[1] T.Kataoka, K.Kajikawa, J.Kitagawa, Y.Kadoya, and Y.Takemura, Appl. Phys. Lett. **97**, 201110 (2010)
[2] A.Takazato, M.Kamakura, T.Matsui, J.Kitagawa, and Y.Kadoya, Appl. Phys. Lett. **90**, 101119 (2007).
[3] M. Tani, K,-S. Lee, and X.-C. Xhang, Appl. Phys. Lett. **77**, 1396 (2000).