テラヘルツオシロスコープ技術の開拓

研究代表者　　有川　敬　　京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻・助教

1 はじめに

次世代無線通信（Beyond 5G）での利用を見込み、集積可能な半導体ベースのテラヘルツ発振器の研究開発が世界的に活発化している[1]。様々な負性抵抗素子（共鳴トンネルダイオード[2]、インパットダイオード[3]、ガンダイオード[4]、シリコン CMOS トランジスタ[5]など）を用いたテラヘルツ発振器が実現しており、高周波数化が著しい[6]。高周波発振器の評価は技術的に難しく、現在可能なのはヘテロダイン検波（RF 周波数帯への下方変換）を用いた放射スペクトル測定である[7]。しかし、このような周波数領域測定は、発振器の定常状態の評価に過ぎない。一方で無線通信では変調が不可欠であり、高速変調時に振幅・周波数・位相がどのように動的に応答するかが本質的に重要である。通常このような評価にはオシロスコープを用いた時間領域での波形計測を行うが、もちろんテラヘルツの帯域を持った市販のオシロスコープは存在しない。そこで本研究では、フォトニクス技術（フェムト秒パルスレーザー）を用いる事でテラヘルツオシロスコープ技術を実現する。これにより無線通信で不可欠な高速変調時の発振器特性を明らかにする技術を確立し、次世代の無線通信技術開発を加速させることを目的としている。

2 実験手法

2-1 テラヘルツ時間領域分光法

時間領域での電場波形測定は、レーザーベースのテラヘルツ分光の世界では 30 年以上前から行われており、テラヘルツ時間領域分光法と呼ばれている[8-10]。その概要を図 1(a)に示す。この手法ではモード同期フェムト秒レーザー（典型的には中心波長 800 nm）を用いてテラヘルツパルスを発生させ、またその電場の値を同じフェムト秒プローブパルスで電気光学サンプリングする[11]。その際、フェムト秒レーザーと同じ繰り返し周期で同じ波形のテラヘルツパルスが発生することを利用し、多数回積算する事で微弱な信号を取得する。また、テラヘルツパルスとプローブパルスが検出に用いる電気光学結晶に到着する時間を掃引することで、電場波形全体を再現することが可能になる。しかし、同じ手法をそのままテラヘルツ発振器に適用することはできない。それは、図 1(b)に示すように、放射されるテラヘルツ波とサンプリングパルスとの位相関係が固定されていないため、サンプリングパルスはランダムに異なる電場値を計測し、積算の結果信号はゼロとなるからである。本研究では積算及び時間掃引に頼らずに電場波形を計測するために、シングルショットテラヘルツ時間領域分光法を用いた。

2-2 シングルショットテラヘルツ時間領域分光法

シングルショットテラヘルツ時間領域分光法は単一のプローブパルスで積算、時間掃引を行うことなく電場波形を取得可能な方法である。これにより、位相揺らぎのある半導体テラヘルツ発振器からのテラヘルツ電場も計測可能になると期待できる。これまでチャープパルスによる時間-周波数マッピング[12]や斜め入射プローブパルスによる時間-空間マッピング[13]などの手法が提案されてきた。しかし、どの手法も時間分解能や計測可能時間幅に関して一長一短であった。しかし近年、それらを解決する新たな手法が提案された[14]。図 1(c)にその概要を示す。この手法ではエシェロンミラーと呼ばれるノコギリ波状のミラーを用いることで波面を傾ける。そにより、単一のプローブパルスから位置によって到着時間の異なるプローブビームを作ることができる。このビームをレンズにより電気光学結晶に集光することでプローブパルス列を作ることができ、それぞれのプローブパルスによって異なる時間の電場を計測する。その後再びレンズで各パルスを空間的に分離し、カメラを用いて計測することで、時間-空間マッピングを行い、電場波形を再現する。

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書　第37号　2022年度

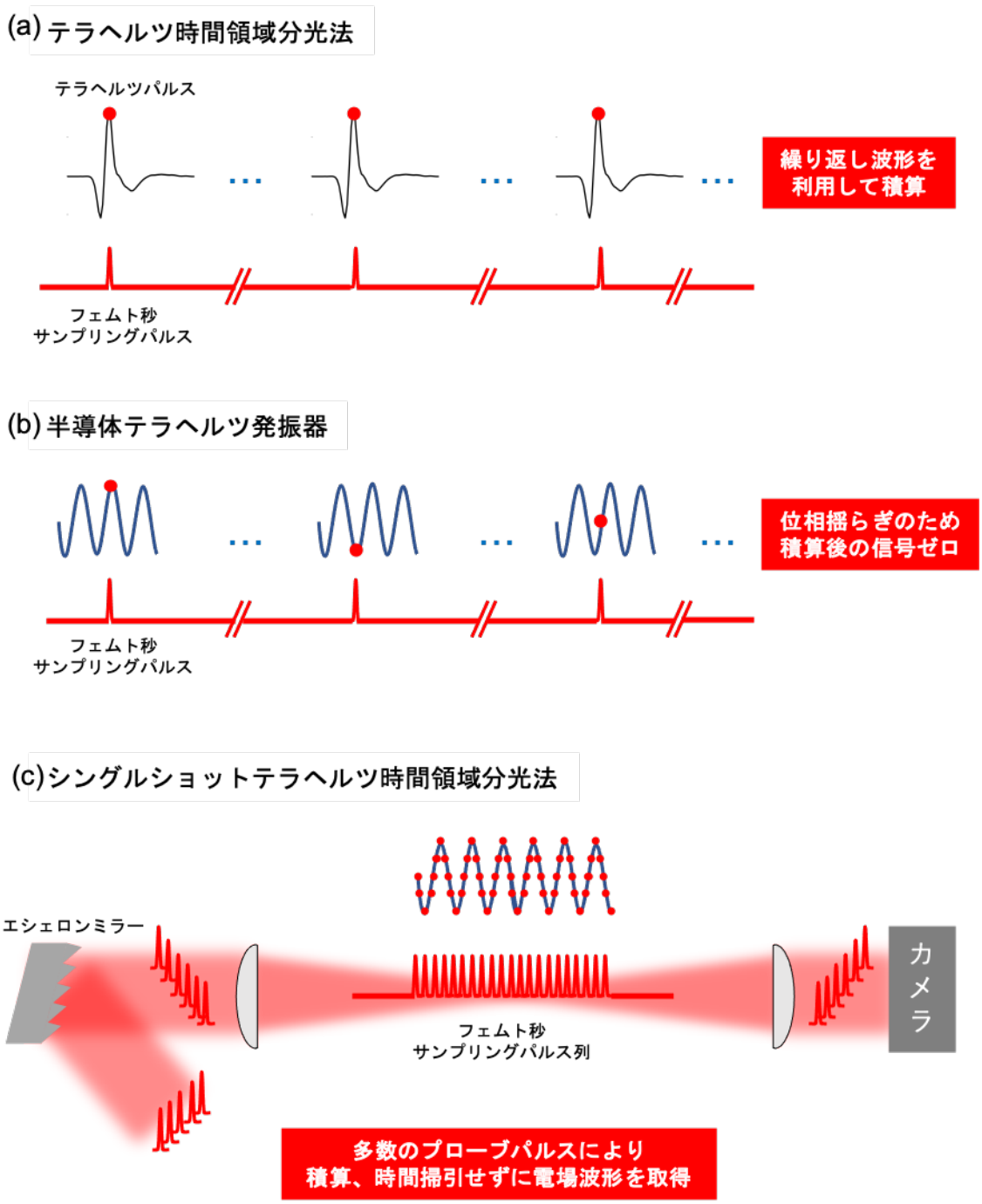

図 1　(a)テラヘルツ時間領域分光法における電場測定。(b)半導体テラヘルツ発振器の光サンプリングが不可能であることを示した概念図。(c)シングルショットテラヘルツ時間領域分光法の概念図。

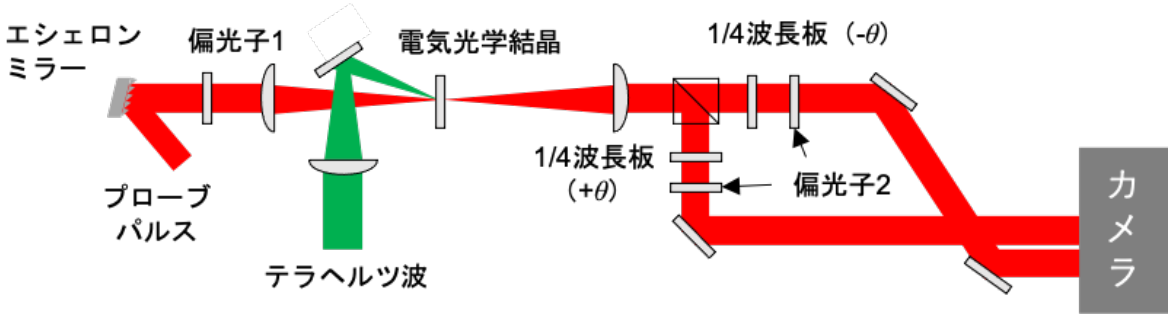

図 2　光学系の概要。

2-3 実験光学系

図 2 にシングルショットテラヘルツ時間領域分光法の光学系を示す。半導体テラヘルツ発振器から出力されたテラヘルツ波は電気光学結晶へ集光されている。また、プローブ光はエシェロンミラーで反射された後、偏光子 1 によって直線偏光（水平）であることを担保した上でレンズによって電気光学結晶に集光されている。通常の電気光学サンプリングでは、電気光学効果によって変調を受けたプローブ光の偏光状態を 1/4 波長板、偏光ビームスプリッター、バランス検出器を用いて計測し、テラヘルツ波の電場情報を得る[11]。この信号は非常に小さいため、ロックイン検出などの高感度検出技術が用いられるが、シングルショットテラヘルツ時間領域分光法ではプローブ光の検出にカメラを用いているため、同じ手法が利用できない。そこで、カメラのダイナミックレンジを最大限に生かすことで高感度検出するために、位相オフセット法[15-17]と呼ばれる手法を取り入れている。この手法では、電気光学結晶（厚みl、屈折率n、電気光学テンソルr）を透過したプローブパルス（波長λ、強度I_0）を無偏光ビームスプリッターで二つに分けた後、1/4 波長板および偏光子 1 と垂直に配置した偏光子 2 を透過させる。カメラで検出されるプローブ光の強度$I(\theta,\Gamma)$は以下のように計算できる。

$$I(\theta,\Gamma)=\frac{1}{2}I_0(\sin^2(2\theta)\cos^2(\Gamma/2)+\sin^2(\Gamma/2)+\sin(2\theta)\sin(\Gamma)+\cos^2(2\theta)\sin^2(\Gamma/2))$$

ここで、θ は 1/4 波長板の速軸と水平方向のなす角、$\Gamma=\frac{2\pi l}{\lambda}n^3r_{41}E_{THz}$はテラヘルツ電場$E_{THz}$による電気光学効果で生じる位相遅延量である。図 2 に示したように、二つの 1/4 波長板の角度を± θ に設定し、それらの差分をとることで、以下のようにテラヘルツ電場の値を測定することができる。

$$\frac{I(+\theta,\Gamma)-I(-\theta,\Gamma)}{I(\theta,\Gamma=0)}=\frac{2sin(\Gamma)}{sin(2\theta)}\approx\frac{2\Gamma}{sin(2\theta)}\propto E_{THz}$$

最後に$\Gamma\ll 1$の近似を行った。この手法を用いることで、1/4 波長板の角度 θ をΓと同程度に設定することで、バックグラウンド信号強度に対してテラヘルツ波による信号強度を大きくすることができ、カメラのダイナミックレンジを最大限に利用したテラヘルツ波信号の高感度計測が可能になる。

2-4 インパットテラヘルツ発振器

本研究では半導体テラヘルツ波光源として TeraSense 社のインパットダイオード発振器を利用した。発振周波数は約 149 GHz、最大出力は 15 mW 程度である。

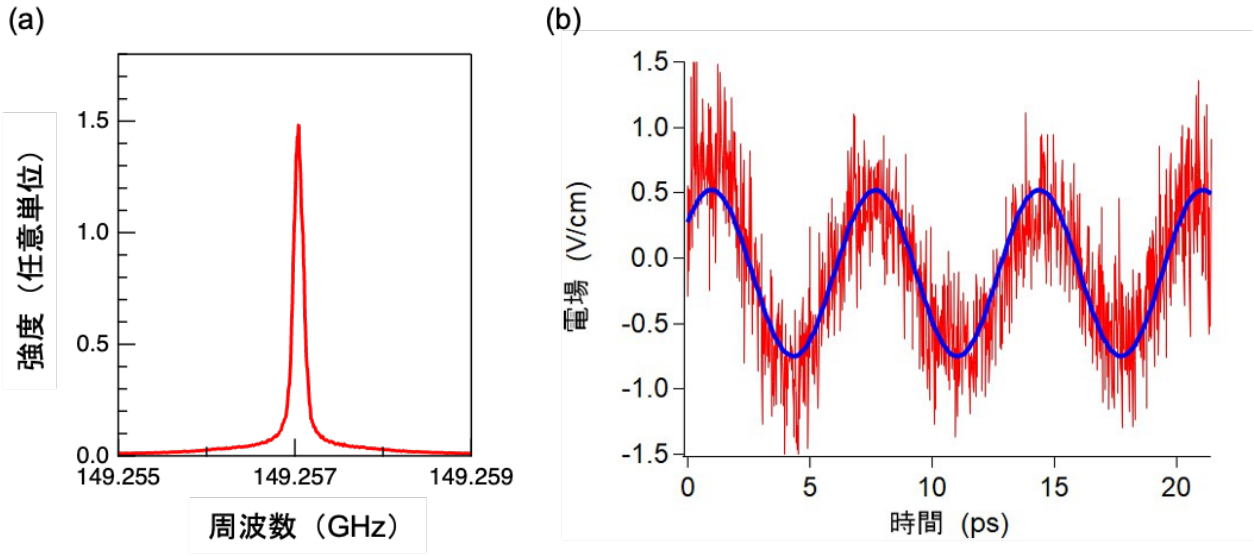

図 3　(a)インパットダイオード発振器から出力されるテラヘルツ波のスペクトル。(b)インパットダイオード発振器から出力されるテラヘルツ電場波形。

3 実験結果

図 3(a)はインパットダイオード発振器から放射されたテラヘルツ波のスペクトルをヘテロダイン検波法[18]を用いて測定した結果である。中心周波数は約 149.257 GHz、線幅 0.13MHz の狭線幅テラヘルツ波が出力されていることがわかる。図 3(b)はシングルショットテラヘルツ時間領域分光法を用いて測定したインパットダイオード発振器から放射されたテラヘルツ波の電場波形を測定したものである。前節で述べた高感度化により、1 V/cm 未満の微弱な連続テラヘルツ波電場の測定に成功した。観測された電場の値は、電気光学結晶位置でのテラヘルツ波のパワー（約 1 mW）とスポットサイズ（約 3 mm）から見積もられる値（1.6 V/cm）とほぼ一致している。電場波形をサイン波でフィッティングしたのが図 3(b)青線である。得られた周波数は 149 ± 5 GHz となり、図 3(a)の周波数領域測定の結果と一致した。

同様の測定を 100 回繰り返した結果の一部を示したのが図 4 である。測定は 5 Hz で行われているため、各波形は 0.2 秒ごとにテラヘルツ波の電場波形を測定したものに対応する。電場波形の振動位相を見ると、各データで異なっていることがわかる。これは、検出に使われているパルスを出力しているレーザーとインパットダイオードの発振周波数が同期されていないためである。前節で述べたように、通常のテラヘルツ時間領域分光法ではこのような電場波形の取得は困難であるため、シングルショット測定で初めて実現した電場波形測定であることがわかる。

4 まとめ

本研究ではシングルショットテラヘルツ時間領域分光法を用いることで半導体テラヘルツ発振器（インパットダイオード）から出力された連続テラヘルツ波の電場波形を時間領域で計測することに成功した。今後、検出感度や検出時間範囲の改善によりオシロスコープとしての性能を向上することで、発振器の動的特性評価に有効な手法となると期待できる。

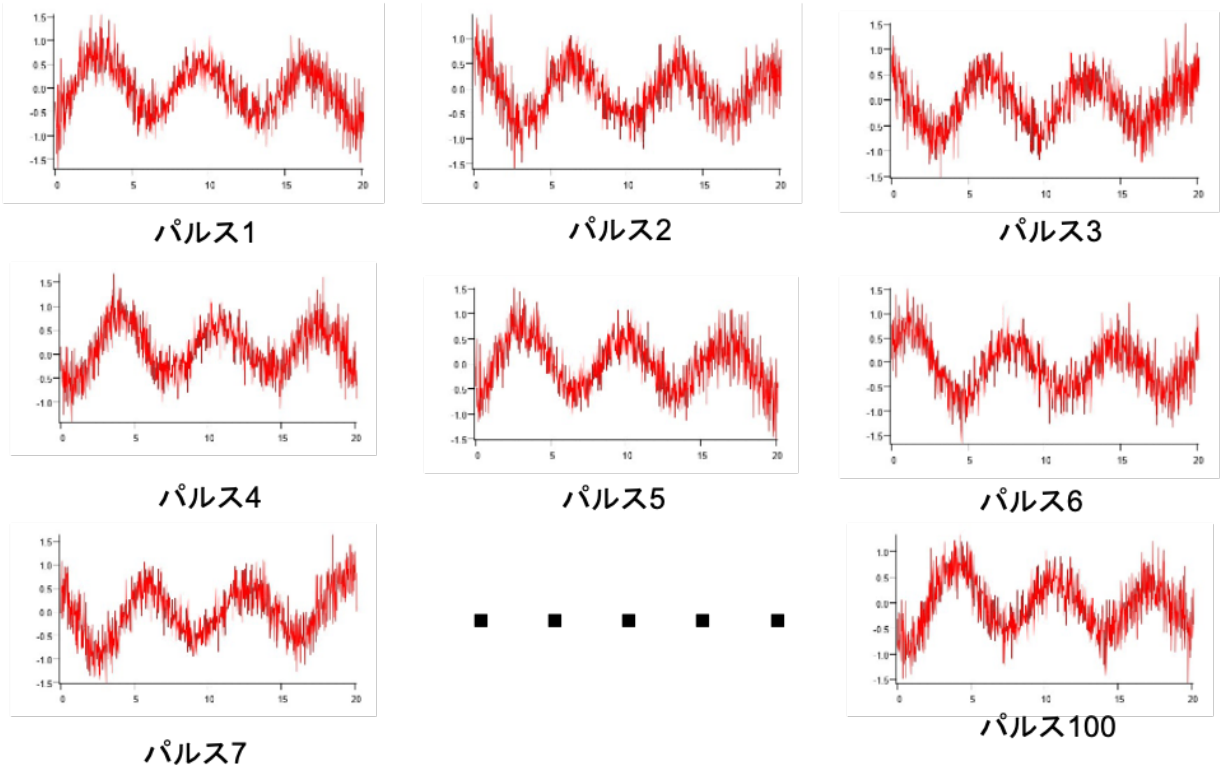

図 4　0.2 秒ごとに測定したインパットダイオード発振器のテラヘルツ電場波形。各グラフの横軸は 0 – 20 ピコ秒である。

5 謝辞

本研究は横浜国立大学の片山郁文教授、玉置亮助教、笠井達基氏、髙橋洸矢氏との共同研究で行われたものである。

【参考文献】

[1]　鈴木左文　「コンパクトな半導体デバイスを用いた テラヘルツ開拓」
電子情報通信学会　通信ソサイエティマガジン 12 巻 3 号 p. 183-189 (2018)

[2]　Asada, M. & Suzuki, S. Terahertz emitter using resonant-tunneling diode and applications. *Sensors* 21, 1-20 (2021).

[3]　Ino, M., Ishibashi, T. & Ohmori, M. C.W. oscillation with p+-p-n+ silicon impatt diodes in 200 GHz and 300 GHz bands. *Electron. Lett.* 12, 148-149 (1976).

[4]　Eisele, H. & Kamoua, R. Submillimeter-wave InP Gunn devices. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 52, 2371-2378 (2004).

[5]　Steyaert, W. & Reynaert, P. A 0.54THz Signal Generator in 40 nm Bulk CMOS. *IEEE J. Solid-State Circuits* 49, 1617-1626 (2014).

[6] Izumi, R., Suzuki, S. & Asada, M. 1.98 THz resonant-tunneling-diode oscillator with reduced conduction loss by thick antenna electrode. In *Proc. 2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* 1-2 (IEEE, 2017).
[7] Karashima, K. et al. Measurement of Oscillation Frequency and Spectral Linewidth of Sub-Terahertz InP-Based Resonant Tunneling Diode Oscillators Using Ni-InP Schottky Barrier Diode. *Jpn. J. Appl. Phys.* 49, 1-3 (2010).
[8] Smith, P. R., Auston, D. H. & Nuss, M. C. Subpicosecond Photoconducting Dipole Antennas. *IEEE J. Quantum Electron.* 24, 255-260 (1988).
[9] Fattinger, Ch. & Grischkowsky, D. Terahertz beams. *Appl. Phys. Lett.* 54, 490-492 (1989).
[10] 阪井清美、分光研究 第50巻 第6号、p.261-273 (2001)
[11] Wu, Q. & Zhang, X.-C. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams. *Appl. Phys. Lett.* 67, 3523-3525 (1995).
[12] Jiang, Z. & Zhang, X. C. Electro-optic measurement of THz field pulses with a chirped optical beam. *Appl. Phys. Lett.* 72, 1945-1947 (1998).
[13] Shan, J. et al. Single-shot measurement of terahertz electromagnetic pulses by use of electro-optic sampling. *Optics Letters* 25, 426-428 (2000).
[14] Minami, Y., Hayashi, Y., Takeda, J., & Katayama, I. Single-shot measurement of a terahertz electric-field waveform using a reflective echelon mirror. *Appl. Phys. Lett.* 103, 051103 (2013).
[15] Brunner, F. D. J., et al. Distortion-free enhancement of terahertz signals measured by electro-optic sampling I Theory. *J. Opt. Soc. Am. B* 31, 904 (2014).
[16] Degert, J., Cornet, M., Abraham, E. & Freysz, E. Simple and distortion-free optical sampling of terahertz pulses via heterodyne detection schemes. *J. Opt. Soc. Am. B* 33, 2045 (2016).
[17] Asai, G. et al. High-throughput terahertz spectral line imaging using an echelon mirror. *Opt. Express* 29, 3515-3523 (2021).
[18] Hiraoka, T. et al. Injection locking and noise reduction of resonant tunneling diode terahertz oscillator. *APL Photonics* 6, (2021).

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
シングルショットテラヘルツ時間領域分光法を用いた連続波テラヘルツ光源の電場波形計測	第83回応用物理学会秋季学術講演会	2022年9月発表予定