

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  $149 \pm 5$  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对应する。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。

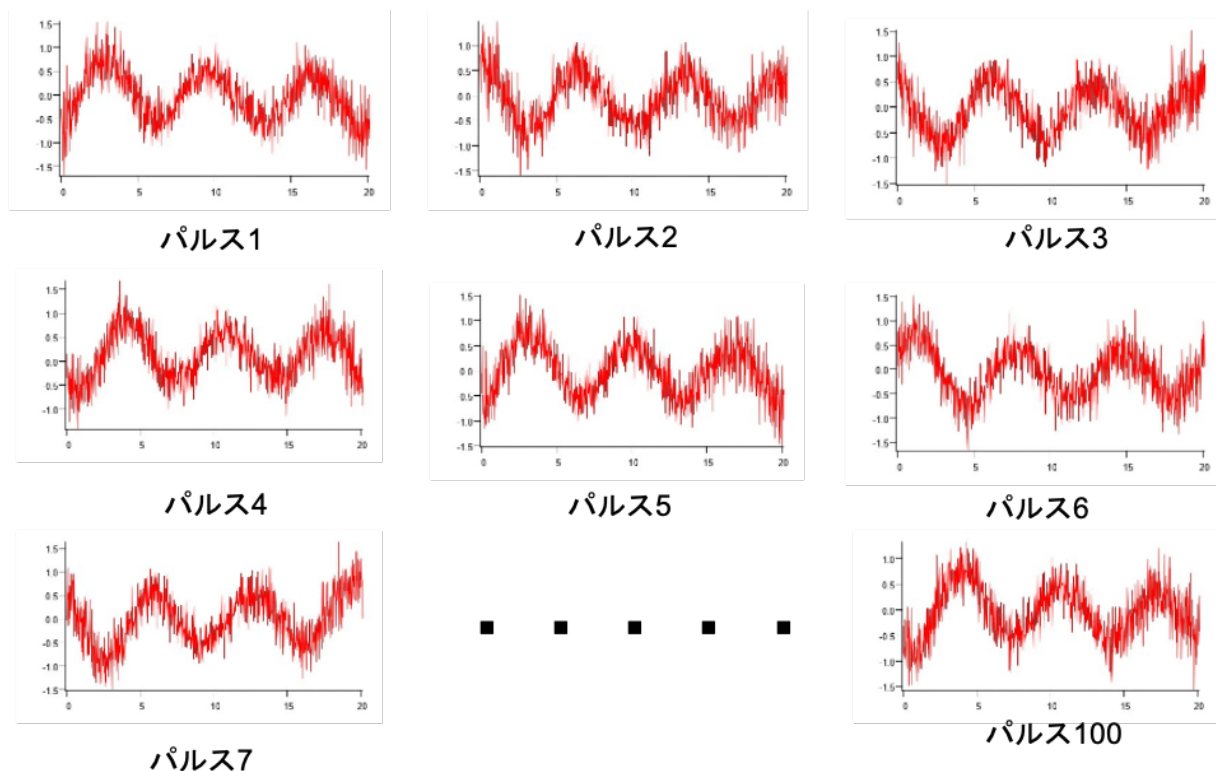


図 4 0.2 秒ごとに測定したインパットダイオード発振器のテラヘルツ電場波形。各グラフの横軸は 0 – 20 ピコ秒である。

## 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、高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<sup>+</sup>-p-n<sup>+</sup> 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