

## 6G 通信に向けた 300 GHz 帯テラヘルツ波発生

日大生産工(学部) ○井上 雄太 恩田 健生 堤 陽人  
 日大生産工(院) 吉田 靖典 中村 海稀 谷口 遼紀 大久保 樹人  
 日大生産工 野邑 寿仁亜 石澤 淳

### 1. まえがき

近年、スマートフォンや IoT 機器の普及に伴い、移動通信システムに求められるデータ通信量や通信速度の向上、低遅延化の要求が急速に高まっている。現在は 4G や 5G が利用されており、2030 年には 6G の実用化が期待されている。6G では、300 GHz に及ぶテラヘルツ帯の搬送波利用が検討されており、5G と比較して高速かつ大容量の無線通信が可能になると予測されている。6G が実用化されることで、超高速・大容量通信の実現、通信エリアの拡大、多数同時接続といった通信の高度化が可能となる。

本研究は、超高速・大容量通信および超低遅延通信を支える技術のコア部分に着目したものである。従来用いられてきた水晶等を利用した基準信号を倍増器により目的の周波数まで倍増する電気的手法では、倍増段数の増加に伴い信号源の位相雑音が倍増比の 2 乗に比例して増大する。そのため、搬送波の周波数が高くなるにつれて位相雑音が増大し、通信品質が劣化する。

我々は 300 GHz という高周波信号を扱うため、キャリアプラズマ効果による屈折率変化を利用したシリコン変調器 (Si-mod) を用いて電気光学変調コム (EO コム) を発生させ、光電変換により低位相雑音の 300 GHz 搬送波を生成し、位相雑音特性の評価を行う。また、EO コム発生に一般的に用いられる電気光学効果を利用した LiNbO<sub>3</sub>変調器 (LN-mod) との比較を行う。

### 2. 提案手法と実験装置系

Fig. 1 に本研究で用いた実験装置系を示す。種光源として連続波半導体レーザー（線幅：7 Hz、波長：1552 nm）を用いた。出力された光は 9 : 1 カプラーによって 2 分岐され、出力の 9 割は強度変調器及び 5 台直列接続された

Si-mod（作用長：2 mm × 5 台）へ入力される。RF 信号発生器からの 25 GHz 正弦波信号を印加しキャリアアラズマ効果で変調を行い、25 GHz 繰り返し EO コムを発生させる。一方、カプラーで分岐した残りの 1 割の光は基準周波数としてファブリペローフィルター (FPF) 側へ送られる。

得られた光はエルビウム添加光ファイバーモード増幅器で増幅され、FPF を介して自然放出増幅光による雑音が抑制される。その後、任意波形整形器で、EO コムのうち 12 本分離れた 2 本のスペクトル（周波数間隔 300 GHz）を抽出する。得られた光信号の強度を可変光減衰器で調整し、单一走行キャリアアラズマオトダイオード (UTC-PD) で光信号を RF 信号に変換する。

変換後の RF 信号と 12.5 GHz の局部発振 (LO) 信号をサブハーモニックミキサ (SHM) で混合し、ダウンコンバートする。出力された信号の位相雑音をスペクトラムアナライザ (RF-SA) で観測し、位相雑音特性の評価を行う。

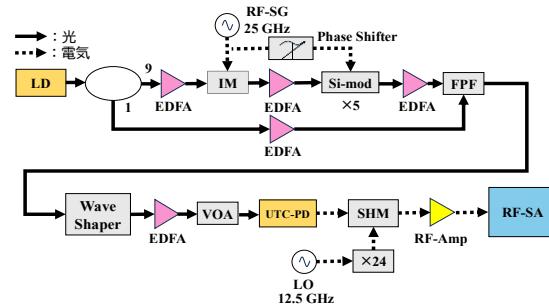


Fig. 1 実験配置図

LD: Continuous Wave Laser Diode, IM: Intensity Modulator, Si-mod: Silicon modulator, RF-SG: Radio Frequency-Signal Generator, FPF: Fabry-Pérot Filter, VOA: Variable Optical Attenuator, UTC-PD: Uni-traveling-carrier photodiode, SHM: Sub Harmonic Mixer, LO: Local Oscillator, EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier, RF-amp: RF-Amplifier, RF-SA: RF-Spectrum Analyzer, Wave Shaper®: Optical Programmable Filter

## 300 GHz band terahertz wave generation for 6G communications

Yuta INOUE, Takeru ONDA, Haruto TSUTSUMI, Yasunori YOSHIDA,  
 Mitsuki NAKAMURA, Haruki YAGUCHI, Tatsuto OKUBO,  
 Junia NOMURA and Atsushi ISHIZAWA

### 3. 実験結果

キャリアプラズマ効果による屈折率変化を利用するSi-modを用いて、EOコムを発生させた。光コムのモード間隔25 GHz、スペクトル14本の帯域幅2.30 nmのシリコンEOコムが生成された (Fig. 2)。

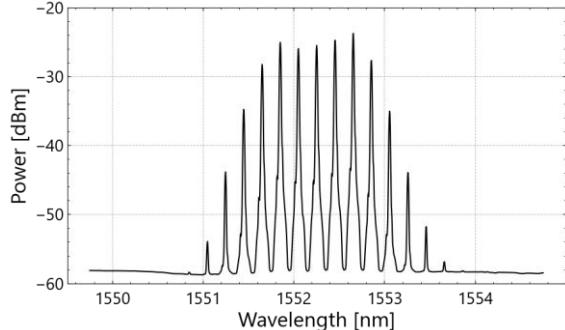


Fig. 2 シリコン EO コムスペクトル

任意波形整形器で得られた 300 GHz 間隔のスペクトルを Fig. 3 に示す。信号対雑音比 15 dB 以上を持つ 300 GHz の信号を確認した。

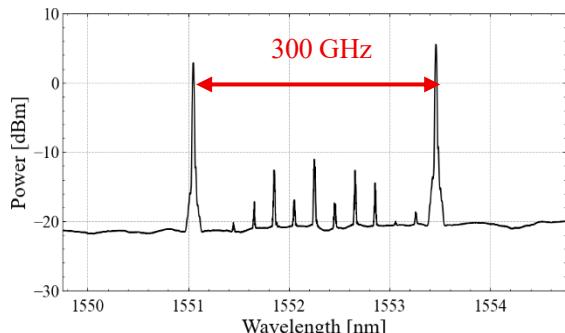


Fig. 3 周波数差 300 GHz のスペクトル

UTC-PDとSHMをH型導波管で結合し、搬送波300 GHzのRF信号を伝送させた。

RF-SAで観測した出力信号の位相雑音特性をFig. 4 に示す。(1)Si-modを用いたEOコムと(2)LN-modを用いたEOコムによる300 GHz搬送波信号の位相雑音を示している。黒線はLOの位相雑音特性を示しており、本測定系のノイズフロアである。オフセット周波数100 Hz以下領域Iでは、(1)と(2)の位相雑音特性は類似であることが分かる。100 Hz以上100 kHz以下領域IIでは、(1), (2)ともに位相雑音特性はノイズフロアに達していることが分かる。一方、オフセット周波数100 kHz以上領域IIIでは、(2)よりも(1)の位相雑音の方が大きいことが分かる。(1)における300 GHz間隔スペクトルの信号対雑音比が低いことが考えられる。

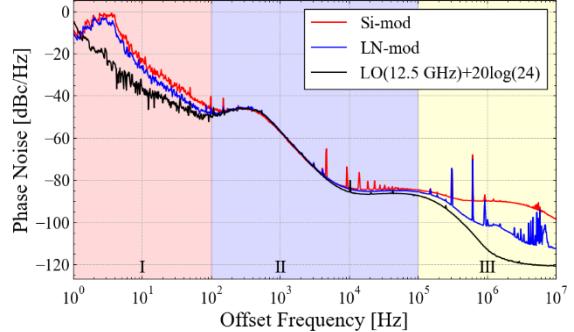


Fig. 4 300 GHz 搬送波の位相雑音特性

### 4. 結論及び今後の展望

Si-mod を用いた EO コムと UTC-PD による光差周波混合により、300 GHz 帯テラヘルツ波の発生に成功した。

本実験の結果、Si-mod および LN-mod を用いた場合の 300 GHz 搬送波信号の位相雑音特性は、オフセット周波数 100 kHz 以上で差異が見られたものの、類似であることが分かった。LN-mod に比べて Si-mod は高い集積密度を有していることから、今後、Si-mod を用いた EO コムの信号対雑音比を増加させることで、更なる位相雑音低減を行う。

### 参考文献

- 1) A. Ishizawa, T. Nishikawa, K. Hitachi, T. Akatsuka and K. Oguri, “Optical-referenceless optical frequency counter with twelve-digit absolute accuracy,” scientific reports 13.1, 8750, 2023.
- 2) K. Iwamoto, et al, “300-GHz-band wireless communication using a low phase noise photonic source,” 554-555, 2020.
- 3) 山口 剛史ほか, 光ビート法による高周波発生における光パルス圧縮を用いた出力の増大—光源の線幅と出力の位相雑音—, 電子情報通信学会総合大会, p.193, 2017.
- 4) A. Ishizawa, et al, “Direct f-3f self-referencing using an integrated silicon-nitride waveguide,” Optics Express 30.4, 5265-5273, 2022.