

# 論文の内容の要旨

論文題目 光技術による 100 GHz 超ミリ波信号の発生  
及びその無線通信応用に関する研究

氏名 枚田 明彦

近年、動画配信サービス等による情報大容量化とコンテンツ多様化への要請に備え、ギガビットを超える広帯域無線通信に対するニーズが高まっている。ギガビット級の伝送速度を実現する手法として注目されているのが、ミリ波帯(30~300 GHz)を利用した無線システムである。既に 60 GHz のキャリア周波数を用いて最大 1.5 Gbit/s の伝送速度を実現した無線システムも登場しており、更なる高速化を目指して 70 GHz、80 GHz、及び 90 GHz 帯のミリ波無線システムの開発が進められている。しかし、ミリ波無線においても 10 Gbit/s の伝送速度を有する無線通信システムは実現されていない。一般に無線システムの伝送速度はキャリア周波数に依存するため、10 Gbit/s の伝送速度を実現するためには 100 GHz を超える周波数帯をキャリア周波数に使用する必要があると考えられる。しかし、現状では 100 GHz を超える周波数帯を用いたシステムの開発はほとんど行われていない。これは主に電子デバイスの特性は周波数の上昇と共に劣化するため、現状の電子回路技術では 100 GHz を大きく超えるような周波数領域で動作する商用レベルの電子デバイスが得られていないことが原因である。

そこで、本論文では 100 GHz を超える周波数帯のミリ波信号の発生を可能にする光技術を開発し、その特性を評価した。また、これらの光技術を導入した 120 GHz 帯無線システムの開発を行い、製作した無線システムの特性評価を通じて無線通信広帯域化に対する光技術の有効性を解明した。

図1に光技術を導入した 120 GHz 帯ミリ波無線システムの模式図を示す。ミリ波信号発生用光源から 120 GHz の周波数で強度変調された光信号(光ミリ波信号)を発生させる。光ミリ波信号は LiNbO<sub>3</sub> (LN) 光変調器等の光強度変調器によりデータ信号が重畳される。光ミリ波信号の増幅には光増幅器を用いる。光ミリ波信号の光電変換には高

速・高出力の光電変換素子を使用する。光電変換されたミリ波信号は増幅された後、アンテナより空間に放射され、受信機のアンテナにより受信される。受信機での復調にはキャリア信号の再生が不要なショットキバリアダイオードを用いた包絡線検波を用いる。復調されたデータ信号はベースバンド増幅器により増幅された後、サンプリングオシロスコープなどの計測器に入力される。

本論文では能動型モードロックレーザと光通倍技術を組合わせた光源や受動型モードロックレーザ等、100

GHz を超える周波数帯で強度変調された光信号(光ミリ波信号)を発生可能な各種光源(ミリ波信号発生用光源)を製作し、全ての光源において周波数安定性が電波法の規制値 (<300 ppm) を満足していることを確認した。更に、周波数可変幅の大きいミリ波発生用光源としてキャリア抑圧変調法と光ヘテロダイン法を組合わせた光源を開発した。通常の光ヘテロダイン法では発生した複数の光スペクトルの内、所望の周波数差の2本のスペクトルを光フィルタ等で切り出した後光ファイバケーブルで合波する構成を用いている。この構成では光フィルタと光ケーブルが光ファイバで接続された場合、温度変化などにより分波された2つの光信号が通過する光路長差が一定でなくなるため、発生したミリ波信号の位相が変動し、その結果低周波数領域における位相雑音が増加するという問題が生じていた。本研究では光フィルタであるアレイ導波路格子 (AWG) と光コンバイナを同一基板上に集積した平面導波路回路 (PLC) を、光信号の分波・合波に使用している。AWG と光コンバイナは光導波路で接続されているため、分波・合波された二つの光信号の光路長差の変動が抑制され、発生するミリ波信号の位相変動が生じなくなる。この結果、オフセット周波数 100 Hz で  $-75$  dBc/Hz と非常に低い位相雑音を得られた。また、この光源は光変調器に入力する電気信号の周波数を変えることにより、90~125 GHz の範囲でミリ波信号の周波数を調整可能である。

図1に示した無線システムでは光電変換素子として光ミリ波信号の光電変換に単一走行キャリアフォトダイオード (UTC-PD) を使用している。UTC-PDは近年 NTT が開発した高速・高出力を特徴とするフォトダイオードである。本論文では 100 GHz 以上の周波数領域における UTC-PD ミリ波出力の帯域、接合面積及び入力光信号等に対する依存性について、理論的考察を行い実験結果と比較した。この結果、UTC-PD ミリ波出力は空間電荷効果、キャリ

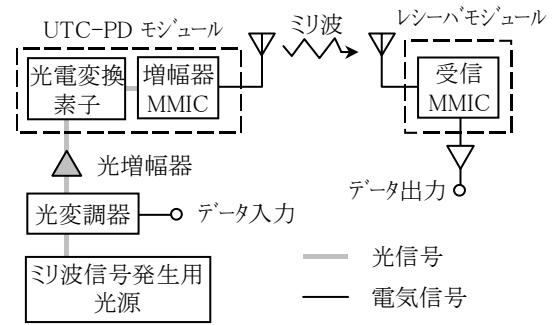


図1 光技術を導入した 120 GHz 帯ミリ波無線システムの構成

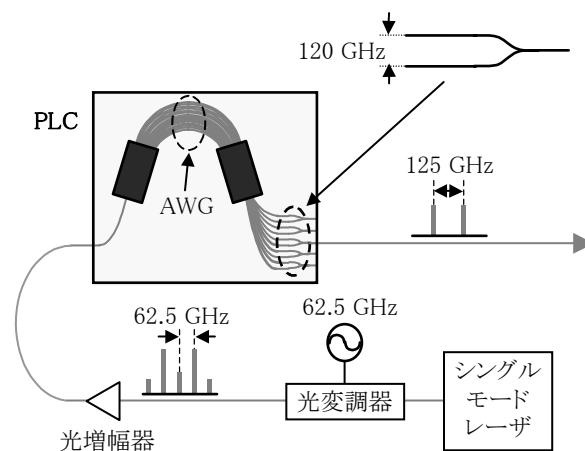


図2 PLC を用いた低位相雑音ミリ波信号発生用光源

ア移動時間により制限される帯域、及び CR 時定数に起因する帯域に依存し、接合面積及び光吸収層厚を最適化することにより、120 GHz 帯において 10 dBm の出力が可能であることを実証した。更に、PD の寄生素子成分による周波数応答の位相回りを打ち消すショートスタブ・インピーダンス変換回路の導入により UTC-PD ミリ波出力を 1.5 倍以上増加可能であることを明らかにした。

本論文では光技術を用いた無線システムにおける低コストのミリ波信号変調方法として PD バイアス変調法を考案している。PD バイアス変調法は図3に示すように光ミリ波信号強度一定の条件で UTC-PD に印加するバイアス電圧を変調することにより UTC-PD のミリ波出力を変調する手法である。UTC-PD 出力はバイアス電圧を  $-1.0\text{ V}$  から  $+0.5\text{ V}$  に変化させることにより 15 dB 以上変化する。UTC-PD 出力のバイアス電圧依存性は、(1) 負荷抵抗両端に発生する電圧が PN 接合の立ち上がり電圧に到達する、(2) 接合容量の増加による動作帯域の低下、(3) 空間電荷効果、により可能

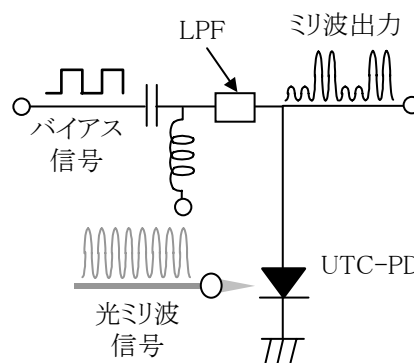


図 3 ローパスフィルタを導入した PD バイアス変調法の模式図

であることを理論的考察と実験結果を比較することにより明らかにした。又、PD バイアス変調法の変調帯域はバイアス回路の伝送帯域に依存するため、バイアス回路にローパスフィルタを導入し伝送損失を低減することにより、7.0 GHz 以上の 3 dB 変調帯域を実現した。バイアス回路の伝送帯域が向上した結果、PD バイアス変調法により 120 GHz ミリ波信号を 10 Gbit/s のデータ速度で ASK 変調することが可能となった。更に送受信機を導波管接続したミリ波無線評価系システムにおいて 10 Gbit/s のエラーフリーデータ伝送が可能であることを実証した。

フォトダイオードとアンテナを集積したアンテナ集積フォトダイオードモジュールでは、UTC-PD で発生したミリ波信号を効率良くアンテナに伝送し、かつ光信号入力用治具がミリ波放射の妨げとならない構造を検討することが重要である。そこで、使用目的に応じて数種類のアンテナ集積フォトダイオードモジュールを作成し、その特性を評価した。図4(a) に示す近距離通信用のアンテナ集積フォトダイオードモジュールは UTC-PD チップ、平面スロットアンテナチップ、Si レンズ、及び光ファイバから構成されており、UTC-PD チップは平面スロットアンテナチップ上にフリップチップ接続されている。フリップチップ接続にはバンプを用いず直接両チップを銀ペーストで接続することにより、接続部での伝送損失を低減した。また、Si 基板上の配線に  $10\text{ }\mu\text{m}$  の厚膜配線を使用するとともに UTC-PD チップが対向する部分に溝を形成することにより、Si 基板が UTC-PD チップ上の配線インピーダンスに影響を与えないようにした。アンテナゲインは 13.5 dBi、最大出力は 7.7 dBm であり、3 dB 帯域は 49 GHz と 10 Gbit/s のデータ伝送に必要な帯域を満たしている。

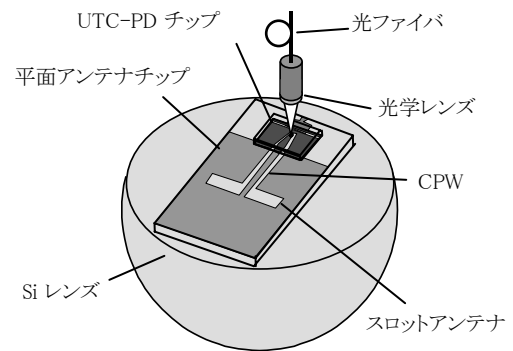
長距離通信用には、カセグレインアンテナ等の高指向性アンテナの使用を可能にする導波管出力フォトダイオード

モジュールを開発した(図4(b))。UTC-PD 出力を導波管に伝送する平面回路-導波管変換基板に基板厚 100  $\mu\text{m}$  の Si 基板を用いることにより、100~140 GHz において 2 dB 以下の変換損失を実現している。更に、フォトダイオードモジュールの実効的な光電変換効率の向上、及び UTC-PD 出力の増幅を目的として HEMT 増幅器チップを集積している。フォトダイオードモジュールの最大出力は 8.6 dBm、3 dB 占有帯域は 16 GHz と 120 GHz のキャリア周波数を用いて 10 Gbit/s のデータ伝送に必要な帯域を有していることを実証した。

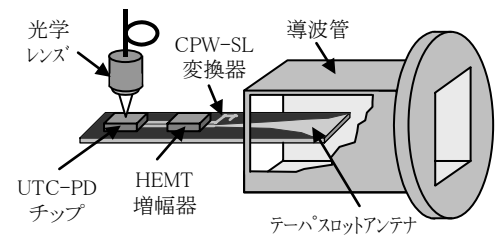
また、光技術の広帯域性を活かすべく、ボウタイアンテナ等の進行波型アンテナを集積したフォトダイオードモジュールも開発した。これらの広帯域フォトダイオードモジュールは電波天文や生体計測等通信以外の応用に使用されている。

上述した光技術を利用したミリ波発生技術の有効性を実証するため、120 GHz 帯ミリ波無線システムを構築し、通信距離 300 m での屋外データ伝送実験を実施した。この無線システムにより受信電力 -30 dBm 以下で世界初となる 10 Gbit/s のデータ伝送エラーフリー伝送に成功した。最大出力、最小受信感度、及びアンテナゲインから算出される晴天時の最大通信距離は 1.5~3.0 km である。

このように本論文は光技術を使用したミリ波信号発生技術は 100 GHz を超える周波数帯を用いた実用的なシステム構築に非常に有効であり、特に従来使用されていなかった周波数帯を利用した広帯域の無線通信システムの構築が可能であることを実証したことを以って電子工学に貢献するところが少なくないと考える。



(a) 近距離通信用フォトダイオードモジュール



(b) 長距離通信用フォトダイオードモジュール

図4 フォトダイオードモジュールの模式図