

単一走行キャリヤ・フォトダイオードによるミリ波・サブミリ波発生とその応用

伊 藤 弘

Generation of Millimeter- and Sub-Millimeter-Waves Using Uni-Traveling-Carrier Photodiodes and Its Applications

Hiroshi ITO

Photonic generation of millimeter- and sub-millimeter-waves using uni-traveling-carrier photodiode (UTC-PD) and its applications are described. The UTC-PD utilizes only electrons as the active carriers and this unique feature is the key to achieving excellent high-speed and high-output characteristics simultaneously. The obtained performance includes a record output powers of over 20 mW at 100 GHz, and more than 2 μ W at 1 THz.

Key words: photodiode, high-output-power, millimeter- and sub-millimeter-wave generation

1. フォトニクス技術を用いたミリ波・サブミリ波発生

高周波信号で強度変調された光信号を光電変換してアンテナで空間に放射すれば、簡易な構成で高周波の電磁波（ミリ波、サブミリ波）を発生させることができる。このような強度変調光は、例えば異なる波長の光を用いたヘテロダイン（ビート発生）により容易に生成でき、すでにテラヘルツを超える変調周波数の光信号発生も報告されている¹⁾。特に、1.55 μ m 帯を用いることは実用的に重要であり、光通信等の用途で開発された豊富な部品/機器を利用することにより、超高周波信号を低損失な光ファイバーで長距離伝送したり、広帯域なファイバーアンプで増幅することも可能となる。このように光部品の特徴を生かすことで、従来の電気部品では実現が困難であったきわめて広い帯域のミリ波・サブミリ波発生源を実現することができる。

このような技術を可能とするためには、高速で高出力の光電変換素子が必要である。通信や計測で広く使われているpin型のフォトダイオード（pin-PD）では、電子に比べドリフト速度の遅い正孔の輸送が素子特性を決定しているため、例えば動作速度を向上させるにはキャリヤー走行距離の短縮が必要である。しかし、走行距離（空乏層厚）の

短縮は接合容量の増大による素子帶域の低下を招き、必ずしも高速化が図れないというジレンマがあった。同様に、飽和出力に関しても、正孔のドリフト速度の低さによる空乏層中の空間電荷（キャリヤー蓄積）が制限していた。

このような制限を解消するため、筆者らは高速性²⁾と高出力特性³⁾を同時に有する新しいフォトダイオード、「単一走行キャリヤ・フォトダイオード」(uni-traveling-carrier photodiode: UTC-PD)⁴⁾を開発した。図1にUTC-PDのバンド図を示す。UTC-PDの光吸収層はp型にドープされているため、発生した正孔（多数キャリヤー）は、電子の移動に伴う電荷不均一に対して集団的に誘電緩和時間程度のきわめて短時間で応答する。したがって、正孔に比べて速度の速い電子の輸送のみが素子の動作速度を決めている。一方、出力飽和に関しても、空乏層中を走行するキャリヤーが電子のみであるため、正孔との走行速度比程度に空間電荷効果が発生しにくい（飽和点が高い）。このようにUTC-PDでは、正孔に比べて速度の速い電子のみを活性なキャリヤーとして用いることにより、動作速度の向上と飽和出力の増大が同時に実現される。

日本電信電話(株)NTT フォトニクス研究所先端光エレクトロニクス研究部 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1)
E-mail: hiro@aecl.ntt.co.jp

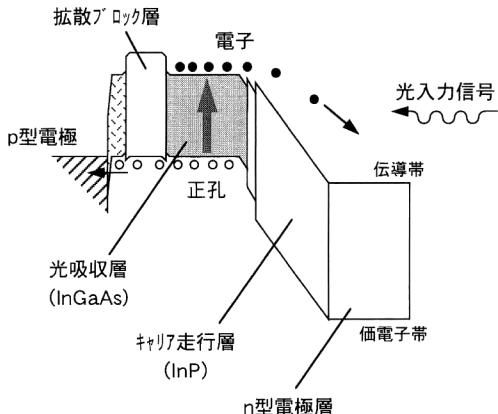


図1 単一走行キャリヤー・フォトダイオード(UTC-PD)のバンド図。

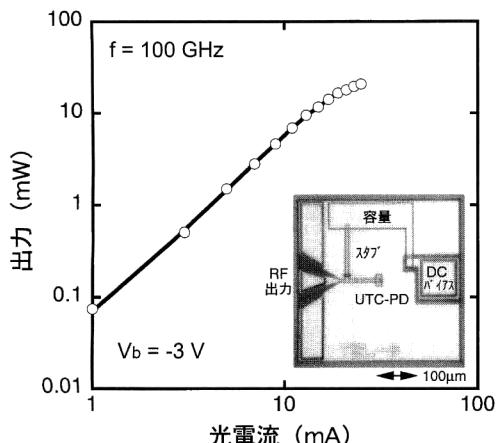


図2 変換回路集積化 UTC-PD の入出力特性とチップ写真(挿入図)。

2. 単一走行キャリヤー・フォトダイオードの出力特性

UTC-PD から発生するミリ波・サブミリ波出力を増大させるためには回路的な工夫が効果的である³⁾。図2の挿入図は、ショートスタブを用いたバイアス回路兼用インピーダンス変換回路を集積化した UTC-PD のチップ写真である。この素子は中心周波数が 100 GHz に設計されている。この回路により、UTC-PD の寄生素子成分による周波数応答の位相回り(CR 帯域の影響)を打ち消すとともに、実効負荷抵抗を増大させることで出力の向上ができる。図2は、この素子からのミリ波出力の光電流依存性を測定したものである。RF 出力は光電流の 2 乗に比例 ($P = 1/2 RI^2$) して線形性よく増大し、最大出力として 20.8 mW が得られた³⁾。この値は、100 GHz 帯において PD の直接光電変換で得られた値としては、これまでの最高値である。図3は、これまでに UTC-PD を用いて得られている RF 出力と、報告されている pin-PD からの RF 出力とを周

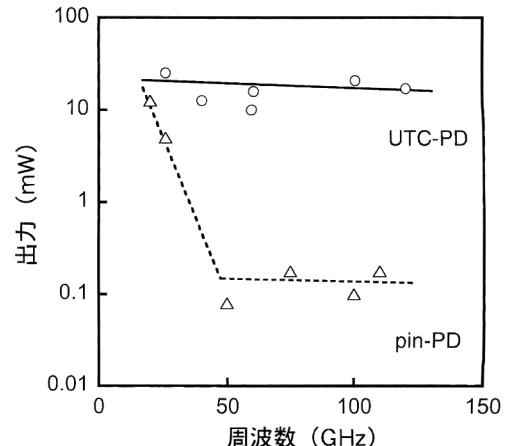


図3 PD からの最大 RF 出力の比較(UTC-PD と pin-PD)。

波数に対してプロットしたものである。低周波数領域では UTC-PD と pin-PD でほぼ同等の出力が得られているが、50 GHz を超える周波数領域では、UTC-PD のほうがおおよそ 2 枠高いミリ波出力を実現できている。この差はおもに、UTC-PD の高飽和電流特性によるものである。

3. ミリ波・サブミリ波発生技術の応用

3.1 無線通信

符号化された高周波光信号をファイバーで伝送し、基地局で光電変換して無線信号を放射する、いわゆる「ファイバー無線技術」は、さまざまなシステムメリットを生むことが提唱されている。UTC-PD の高出力特性を利用すれば、基地局における電気増幅器を排することで、帯域制限の緩和だけでなく小型簡易化、低コスト化などが図れる。これまでに、UTC-PD とアンテナを集積化した素子を用い、キャリヤー周波数 60 GHz において 2.5 Gbit/s 信号のエラーフリー伝送を確認している⁵⁾。また、より広帯域化をめざした検討として、UTC-PD を用いた 120 GHz 帯における 10 Gbit/s 信号のエラーフリー伝送⁶⁾も実現されている。

3.2 電波天文観測用基準信号源

日米欧の国際共同プロジェクトとして、南米チリの高地に、約 10 km 四方に配置したパラボラアンテナ 80 基からなる大型電波望遠鏡(ALMA)⁷⁾を建造する計画が進行している。この電波望遠鏡では、各アンテナの受信器に、30~950 GHz という広帯域で高周波の基準信号を位同期して分配する必要がある。このような要求に対し、高周波信号を光ファイバーで伝送して光電変換する構成は理想的である。そのため、筆者らは、図4に示す「導波管出力型 UTC-PD モジュール」⁸⁾を開発した。このモジュールは、F 帯(90~140 GHz)用に設計されており、最大ミリ波出力として 120 GHz で 17 mW、3 dB 帯域として F 帯(90~

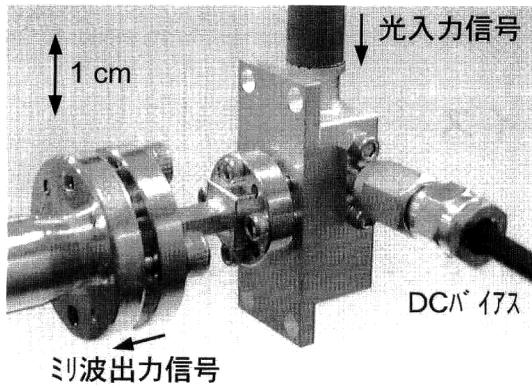


図4 導波管出力型 UTC-PD モジュールの写真。

140 GHz)をカバーする 55 GHz が得られた。このモジュールは、基準信号源以外にも各種計測機器への応用が期待できる。

3.3 イメージング

ミリ波・サブミリ波は物体に対する透過率が比較的高く、逆に水などの特定の物質に対しては透過率が低く、かつ X 線よりも安全なことから、さまざまなイメージング応用が期待されている。例えば、空港などにおけるセキュリティ検査、通関における禁止薬物検査、工業製品の欠陥・特性検査、農産物の水分含有量検査、虫歯や皮膚がんなどの医療診断、紙幣や美術品の真贋判定、木造建築物の構造診断、火災等の現場における暗視カメラなどが考えられている。UTC-PD を用いたミリ波イメージングも、すでにいくつかの例が実現されている⁹⁾。

3.4 分光・分析

分光・分析用の、テラヘルツ域までをカバーするミリ波・サブミリ波源としては、周波数掃引が容易で精度が高く、小型で簡易な構成のものが求められている。図5は、このような目的に適した準光学結合型の UTC-PD モジュールである。UTC-PD と平面アンテナを集積化した素子がシリコンレンズ上に実装されており、発生した電磁波はレンズを通して空間に放射される。このような素子を用いて、これまでに 1 THz で 2 μW 以上のサブミリ波(テラヘルツ波)発生¹⁰⁾を確認している。これは、光電変換により発生させた連続波信号としては、これまで報告されているものの中で最高値である。このような素子を用いることで、分光・分析機器の小型化、遠隔化、広帯域化、低コスト化などが可能になると期待される。

本研究を遂行するにあたりご協力いただいた、NTT フォトニクス研究所、および NTT マイクロシステムインテグレーション研究所の関係各位に感謝いたします。

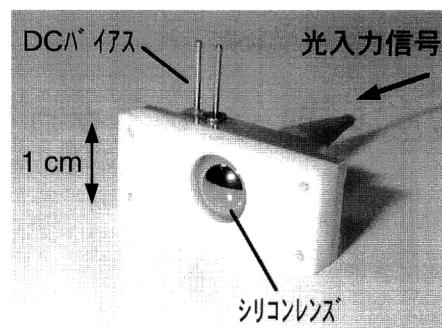


図5 準光学型 UTC-PD モジュールの写真。

文 献

- Y. Matsui, M. D. Pelusi, S. Arahira and Y. Ogawa: "Beat frequency generation up to 3.4 THz from simultaneous two-mode lasing operation of sampled-grating DBR laser," Electron. Lett., **35** (1999) 472-474.
- H. Ito, T. Nagatsuma, A. Hirata, T. Minotani, A. Sasaki, Y. Hirota and T. Ishibashi: "InP/InGaAs uni-travelling-carrier photodiode with a 310 GHz bandwidth," Electron. Lett., **36** (2000) 1809-1810.
- H. Ito, T. Nagatsuma, A. Hirata, T. Minotani, A. Sasaki, Y. Hirota and T. Ishibashi: "High-power photonic millimetre-wave generation at 100 GHz using matching-circuit-integrated uni-travelling-carrier photodiodes," IEE Proc. Optoelectron., **150** (2003) 138-142.
- T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma and T. Furuta: "Uni-traveling-carrier photodiodes," Tech. Dig. Ultrafast Electronics and Optoelectronics (1997 OSA Spring Topical Meeting) (1997) pp. 166-168.
- Y. Doi, S. Fukushima, K. Takahata, K. Yoshino and H. Ito: "Compact high-power photonic millimeter-wave emitter module for 60-GHz-band fiber radio links," IEICE Trans. Electron., **E86-C** (2003) 1311-1317.
- T. Monitani, A. Hirata and T. Nagatsuma: "A broadband 120-GHz Schottky-diode receiver for 10-Gbit/s wireless links," IEICE Trans. Electron., **E86-C** (2003) 1501-1505.
- J. Payne, B. Shillue and A. Vaccari: "Photonic techniques for use on the Atacama large millimeter array," Tech. Dig. Int. Topical Meeting on Microwave Photonics (1999) pp. 105-108.
- H. Ito, T. Ito, Y. Muramoto, T. Furuta and T. Ishibashi: "Rectangular waveguide output uni-traveling-carrier photodiode module for high-power photonic millimeter-wave generation in the F-band," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-21** (2003) 3456-3462.
- A. Sasaki and T. Nagatsuma: "Millimeter-wave imaging using an electrooptic detector as a harmonic mixer," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **6** (2000) 735-740.
- H. Ito, F. Nakajima, T. Furuta, K. Yoshino, Y. Hirota and T. Ishibashi: "Photonic terahertz-wave generation using an antenna-integrated uni-travelling-carrier photodiode," Electron. Lett., **39** (2003) 1828-1829.

(2003年12月29日受理)