

3.6.1 未来 ICT 研究所 超高周波 ICT 研究室

室長 笠松章史 ほか 13 名

超高周波電磁波（ミリ波、テラヘルツ波）利用技術の開拓

【概要】

100 Gbps 級の超高速無線通信や超高速信号計測、テラヘルツ波を用いた高精度な非破壊非接触計測を平成 32 年頃までに可能にするために、超高周波領域での光源、検出器、増幅器、変復調器、光電変換器、アンテナなどの各要素技術、リアルタイム計測による非破壊非接触センサ技術及び超高周波帯での計測に必要な標準を定めるための技術を開発し基盤技術を確立することを目標に研究開発を進めている。

平成 27 年度は前年度に引き続き、ミリ波、テラヘルツ波の利用技術の確立を目的としたデバイスの高性能化と超高速信号測定技術に関連する研究を行うとともに、3 THz 付近のテラヘルツ帯周波数コム発生を目指し、前年度に開発した光パルス光源を用いたテラヘルツ波発生を行った。

【平成 27 年度の成果】

ミリ波、テラヘルツ波の利用技術の確立を目的とし、超高速・高出力電子デバイス技術、システム技術及び超高速信号測定技術に関連する研究を行っている。平成 27 年度は、電子デバイスの高性能化に向けた技術開発と、周波数 500 GHz までの計測環境の構築と各種デバイス特性の実測評価技術の確立を行った。

超高速・高出力デバイス技術に関して、高耐圧・耐熱・耐放射線性に優れ、かつミリ波、テラヘルツ波で高出力が期待される窒化ガリウム (GaN) 系トランジスタについて、ゲート電極と高速電子を物理的・空間的に隔離するための窒化インジウム・アルミニウム (InAlN) バリア層を有する HEMT (High Electron Mobility Transistor) を GaN 自立基板上に作製した結果、従来のサファイア基板や炭化シリコン (SiC) 基板と比べ約 2 桁小さな貫通欠陥密度 ($7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 以下) であることを確認するとともに (図 1)、ゲート長 $L_g = 45 \text{ nm}$ の MES 型 HEMT において日本国内の研究グループとしては最高の最大発振周波数 (f_{max}) 287 GHz を達成した。さらに、低結晶欠陥であるため順方向ゲート電流は 1/10 以下となり、より高い電圧印加に耐える性能を有するなど、テラヘルツ帯での高出力/低雑音増幅器等への応用可能性を示した。シリコンまたは III - V 族化合物半導体で作られる半導体トランジスタの中で、現在のところ最も高い周波数での動作が期待され、テラヘルツ帯の利用に寄与するインジウム・リン (InP) 系トランジスタについて、微細 T 型ゲートを有する HEMT を作製、周波数 50 GHz の雑音特性を評価し、これまで論文等で報告された InP 系 HEMT の中で世界最小の雑音指数 0.6 dB を実現するとともに (図 2)、300 ~ 16 K (+27 ~ -257°C) でデバイス動作とともに極低温下では室温に比べ約 1.2 倍の f_{max} の増加を確認するなど、センシングシステムや冷却型高感度受信機などへの適用可能性を示した。InP 系トランジスタに代わる低雑音・低消費電力トランジスタとして期待されるインジウム・アンチモン (InSb) 系トランジスタについて、東京理科大学との共同開発により微細 T 型ゲートを有する HEMT を作製、表面保護膜として従来の TEOS-CVD 法による SiO_x やホットワイヤー型 CVD 法による SiN に代えて抵抗加熱蒸着による SiO_x を用いた結果、日本国内の研究グループとしては初めて 300 GHz を超える遮断周波数 (f_r) の達成に成功した。



図 1 GaN 自立基板 (左) 及び SiC 基板上の GaN-HEMT の断面構造

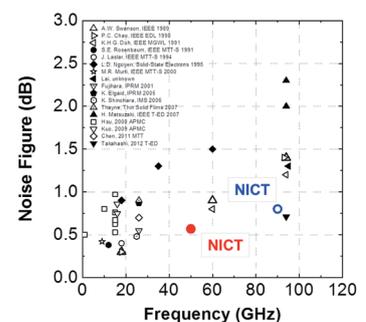


図 2 InP 系 HEMT の雑音指数の周波数依存性

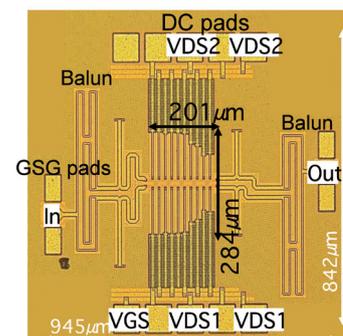


図 3 小型広帯域 D 帯 5 段差動増幅器

システム技術に関して、広島大学との共同開発により、最先端の 40 nm プロセス・シリコン CMOS を用いた D 帯 (110 ~ 170 GHz) 5 段差動増幅器集積回路 (図 3) の設計及び試作を行い、周波数 90 ~ 220 GHz で S パラメータを実測評価した。その結果、回路レイアウトの工夫により性能を維持しつつ 148 GHz で利得 20 dB、かつ 22 GHz の 3 dB 利得幅を実現、小型化・広帯域化に成功し、国際会議 (2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology: RFIT2015) の最優秀発表賞を受賞した。

超高速信号測定技術に関しては、ネットワークアナライザ及び周波数エクステンダにより周波数 500 GHz までの計測環境を構築した。アクティブ/パッシブデバイスの S パラメータの実測評価技術の確立を行うとともに、導波管接続やオンウエハ・プロービング、さらにはアンテナ特性評価などの基盤技術を確立した (図 4)。

周波数利用効率の向上を目指した周波数資源開拓において、いまだ十分に利用されているとは言えないテラヘルツ帯の利用技術の確立を目指し、周波数・パワー等の標準までを見通したテラヘルツ帯計測に関する基盤技術、特にテラヘルツ帯の周波数コム技術を中心に研究開発を実施した。テラヘルツ帯の周波数コムに関して、光技術をベースとしたコム発生を念頭に置いており、そこではテラヘルツ波発生に用いられる近赤外領域のパルス光源が鍵となる。さらに、汎用性を考慮し、コンパクト性・メンテナンスフリーの観点より、これまで (1) 1.55 μm の通信波長帯半導体 CW 発振レーザとマッハツェンダー型ニオブ酸リチウム (LN: lithium niobate) 変調器を組み合わせたパルス光源システム、(2) 1 μm 帯のイッテルビウムドープファイバモードロックレーザ、の 2 点に着目して研究開発を行っている。本年度、前年度開発したフラットなスペクトル分布を有し 3 THz 帯域を有する光周波数コムを用い、ミキシング技術を用いて安定なテラヘルツ波を発生し、これを用いてテラヘルツ帯量子カスケードレーザ出力の周波数安定化を試みた。その結果、図 5 のスペクトルが得られ、周波数安定化に成功した。(2) については、昨年度に高出力化した 1 μm 帯フェムト秒パルス光源と、周期や周期数を調整した周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN: periodically-poled lithium niobate) を組み合わせることにより、マルチサイクルテラヘルツパルスの発生・検出を行った。その結果、分光計測システムに適用可能な周波数可変な狭帯域スペクトルの発生に成功した (図 6)。また、産学との連携により超小型テラヘルツ波プローブの開発を進め、テラヘルツ波発生部と検出部の集積化を行い、1 \times 1.5 mm のセンササイズを実現した (図 7 (a))。また、このプローブを用いて 100 GHz 信号の検出に成功した (図 7 (b))。

このほか、総務省からの委託研究「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発」の 3 課題 (超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術、300 GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術、300 GHz 帯増幅器技術) を民間企業・大学とともにチームを結成して受託し、我が国におけるミリ波・テラヘルツ波の研究開発を牽引した。成果の一例として、日本電信電話株式会社および富士通株式会社との共同開発により 300 GHz 帯でのコンテンツ高速ダウンロード実証を実施、広島大学及びパナソニック株式会社との共同開発によりシリコン 300 GHz 帯送信集積回路によって 100 Gbps 超の伝送速度の実現性を示した。

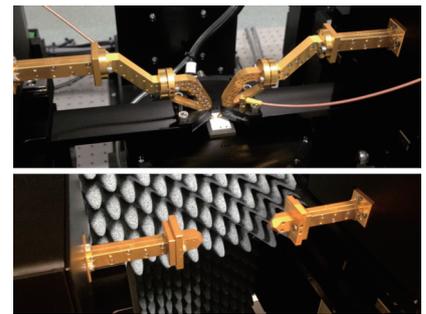


図 4 500 GHz 帯オンウエハ・プロービングによる S パラメータ及びアンテナ特性評価環境

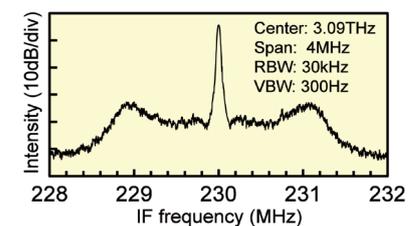


図 5 変調器ベース 1.5 μm 帯光周波数コムを用いて安定化したテラヘルツ量子カスケードレーザのスペクトル

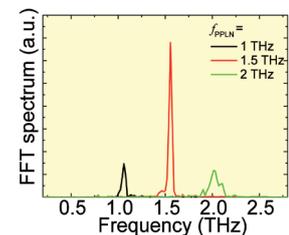


図 6 1 μm 帯高出力光パルス励起により発生したマルチサイクル THz パルスのスペクトル波形

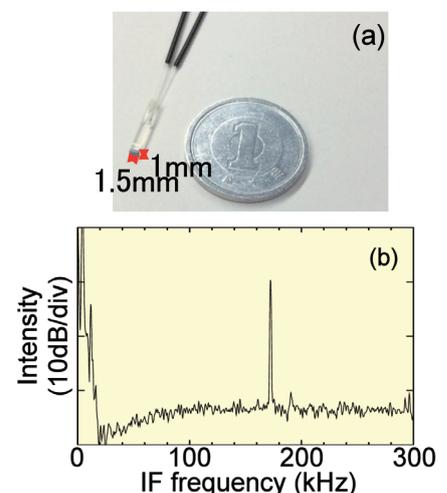


図 7 (a) 作製した超小型プローブの写真、(b) 超小型プローブにより検出した 100 GHz 信号のスペクトル