

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 12 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 2020 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 26 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 26 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 26 年度は、半導体トランジスタの高性能化に向けた技術開発と、周波数 325 GHz までのオンウエハ・プロービング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) を作製し、130 nm のゲート長 L_g を有する HEMT において InAlN バリア層を 2 nm まで薄膜化することで 740 mS/mm を超える相互コンダクタンスを得ることに成功した(図 1)。また $L_g = 45$ nm の HEMT における遮断周波数 f_T は、InAlN バリア層が 2 nm のときに 200 GHz を超えるとともに、InAlN バリア層が 3 nm のときに最大となり、 $f_T = 235$ GHz を得ており、周波数 100 GHz 超のテラヘルツ帯で動作可能な高出力増幅器等への応用の可能性を示した。シリコンないし 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、更なる超高速化を目指し、モンテカルロ法シミュレーションによりゲート電極形状と f_T の関係を解析し、ゲートフット先端部の寸法が実効ゲート長となること、またゲート電極構造 (Model B、図 2) が他の構造と比べ、より高い f_T を得ることを明らかにした。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 DC 特性及び高周波特性に大きく影響するゲート電極形成前に行う反応性イオンエッチング (RIE) の出力を抑え、RIE によるプロセスダメージを低減し、トランジスタ特性の向上を可能とする試作プロセスの開発に成功した。システム技術に関して、シリコン CMOS を用いた集積回路等の設計に用いる超高周波回路設計 EDA (Electronic Design Automation) システムの構築に着手するとともに、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 12 段低雑音増幅器 (LNA) の設計及び試作に成功した(図 3)。

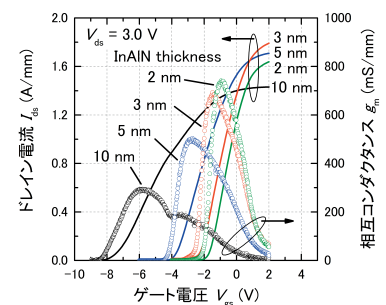


図 1 GaN 系 HEMT における相互コンダクタンス及びドレイン電流の InAlN 膜厚依存性

	Shape of gate foot
Model A	
Model B	
Model C	
Model D	
Model E	

図 2 InP 系 HEMT におけるゲートフット先端部構造

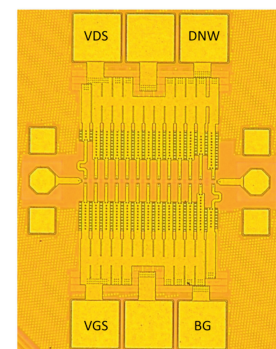


図 3 最先端 40 nm プロセス・シリコン CMOS 12 段低雑音増幅器 (LNA)

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、周波数エクステンダ及びプローブステーションにより周波数 325 GHz までのオンウエハ・プロービング計測環境を構築するとともに、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った(図 4)。一例として、最先端の 40 nm プロセス・シリコン CMOS を用いた 12 段 LNA (図 3) の利得評価について、周波数 90~220 GHz で S パラメータを実測評価し、設計した中心動作周波数である 160 GHz で 14 dB を超える利得を実現するとともに、10 dB を超える利得を周波数 120~195 GHz の超広帯域(帯域幅 75 GHz)での実現に成功した。また、ミリ波、テラヘルツ波におけるアンテナ放射パターン等の評価システムの構築にも着手した。

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、未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ー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。今年度、(1) について、テラヘルツ発生に関わる変調器ベース超短パルス光源の高性能化に着手し、この変調器ベースパルス光源に非線形ファイバーを組み合わせることにより、よりフラットなスペクトル形状を有する 3 THz 帯域の光周波数コムの発生に成功した(図 5)。(2) については、1 μm 帯パルスの高出力化を引き続き行った。独自に開発したダブルクラッド型イッテルビウムドープファイバー増幅器の構成を最適化することにより、100 フェムト秒級の短パルス化に成功し、かつ 3 W 以上の平均出力(繰り返し周波数 100 MHz)が得られた。また、上記のパルス光源からテラヘルツ光を得る手段として、1 μm 帯パルスと非線形結晶の組み合わせによりテラヘルツパルス発生及びスペクトル計測を行った。特にリン化ガリウム結晶を用いたものに関しては、約 3 THz 以上のスペクトル帯域を有することを示した(図 6)。また、変調器ベースパルス光源では、光コムより 2 本のコム成分を抽出し、単一走行キャリアフォトダイオードを用いてテラヘルツ波に変換することにより、3 THz 帯の CW テラヘルツ波発生に成功した。発生テラヘルツ波は、3.095 THz において 10^{-13} 台(1 秒平均)の周波数安定性が得られており(図 7)、これは光変調器を駆動する高周波信号源の安定度に匹敵する。

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ている。

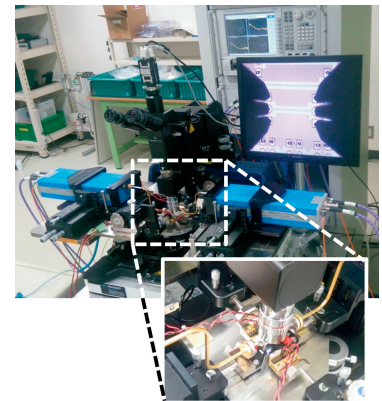


図 4 整備したオンウエハ・プロービング計測環境

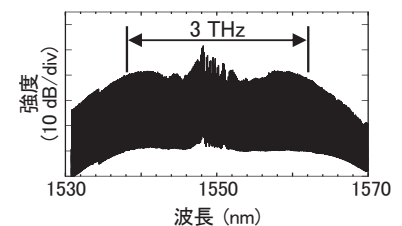


図 5 変調器ベース 1.5 μm 帯光パルス光源から得られた広帯域光周波数コムスペクトル

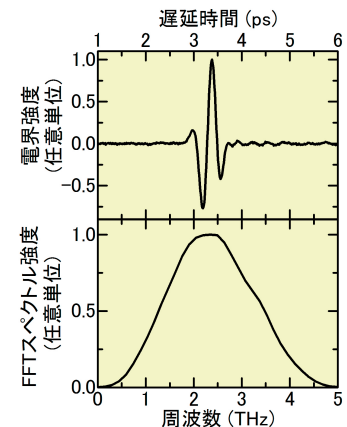


図 6 1 μm 帯増幅後光パルスによる放射テラヘルツパルス波形(上)とそのスペクトル(下)

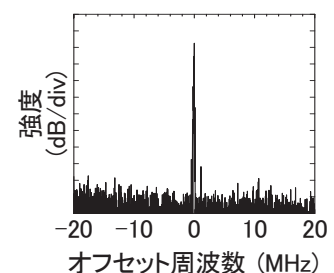


図 7 テラヘルツ変換素子により発生したテラヘルツ波を実際に計測したスペクトル