

### 3.6.1 未来 ICT 研究所 超高周波 ICT 研究室

研究室長 笠松章史 ほか 11 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】

100Gbps 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 24 年度は、ミリ波、テラヘルツ波帯利用技術確立を目的とした超高速・高出力デバイス技術、システム技術に関連する研究を行うとともに、1THz 付近のテラヘルツ帯周波数コムの実現を目指し、前年度開発した光パルス光源の短パルス化等を行った。

##### 【平成 24 年度の成果】

ミリ波、テラヘルツ波帯利用技術確立を目的とし、超高速・高出力電子デバイス技術、システム技術に関連する研究を行っている。平成 24 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、220GHz までの超高速信号測定技術の検討を実施した。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るインジウム・リン (InP) 系トランジスタについて、従来のインジウム・ガリウム砒素 (InGaAs) チャネル層にインジウム砒素 (InAs) 層を挿入した InGaAs/InAs/InGaAs チャネル層を有する HEMT (High Electron Mobility Transistor) において、圧縮歪みによる InAs 層のエネルギーバンド構造の変化と極薄 InAs 層における量子閉じ込め効果 (2 次元電子ガス) を考慮したモンテカルロ計算により、ゲート長を 20nm 程度まで微細化することで世界最高速トランジスタを実現できる可能性を示した (図 1)。高耐圧・耐熱・耐放射線性に優れるとともに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、従来の窒化アルミニウム・ガリウム (AlGaN) バリア層に代えて、窒化インジウム・アルミニウム (InAlN) をバリア層とする HEMT を作製し、200GHz を超える遮断周波数  $f_T$  及び最大発振周波数  $f_{max}$  を得るとともに、AlGaN バリア層の HEMT に比べて 1.5 倍のドレイン電流を得ることに成功した。また、高速・低雑音が利点の InP に代わる新たな材料としてインジウム・アンチモン (InSb) 系トランジスタの研究開発にも着手した。InSb 系トランジスタの作製に必要な半導体ウェハは市場流通しておらず、独自に成長させる必要があるため、東京理科大学と共同開発するとともに、ゲート長 30nm の HEMT を作製し、DC 特性及び高周波動作 ( $f_T=114\text{GHz}$ ) を確認することに成功した。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と周波数エクステンダにより 220GHz までの導波管部品計測環境とともに、オン・ウェハ・プロービング計測環境についても整備を完了し (図 2)、測定精度について評価を開始した。システム技術に関連して、前年度から引き続き、NTT、富士通とのコアアライアンスにより総務省から「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発」を受託し、300GHz 帯の周波数を利用した無線通信技術の研究を実施している。さらに、前年度から引き続き、総務省から技術試験事務「マイクロ波

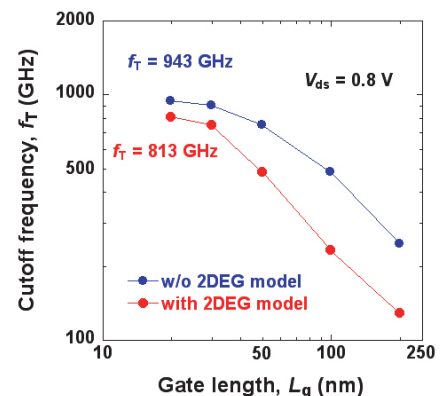


図 1 インジウム・リン (InP) 系 HEMT の遮断周波数 ( $f_T$ ) 予測

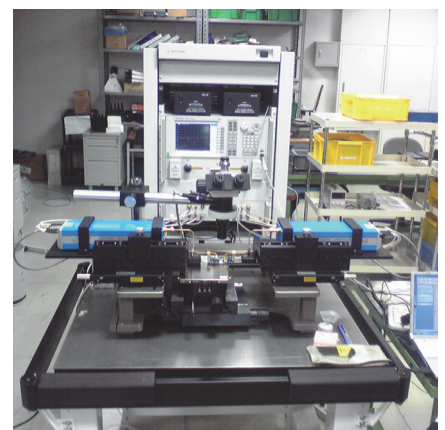


図 2 整備したオン・ウェハ・プロービング計測環境

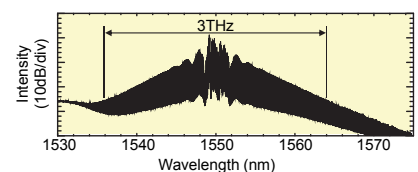


図 3 変調器ベースパルス光源から得られた光周波数コムスペクトル

固定通信回線の高効率化に関する技術的条件の検討」を請け負い、屋外設置型のマイクロ波無線装置の4カ月にわたる長期フィールド試験を実施した。NICTで研究開発を主導しているGaN系HEMTが屋外での厳しい温度条件の下でも正常に動作することを確認した。

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、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・パワー等の標準を含め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を中心に研究開発を実施した。テラヘルツ帯周波数コムの開発に当たっては、光技術を用いたものを念頭に置いているが、その際、テラヘルツ波発生に用いる超短パルス光源が重要な要素となる。さらにコンパクト性・メンテナンスフリー性を重視して、これまで(1)通信波長帯である $1.55\mu\text{m}$ 帯の半導体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) $1\mu\text{m}$ 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点の開発を行っている。今年度は、(1)については、システム中に用いる光ファイバーの分散等の構成検討を行い、3THzに及ぶ光周波数コムの発生に成功した(図3)。(2)については、テラヘルツ波発生のために重要な高出力化を行った。ここでは、 $1\mu\text{m}$ 帯のイッテルビウムドープファイバー(YDF)レーザとYDF増幅器により、パルス幅100fs程度・平均出力50mW以上のモードロック発振に成功した(図4(a))。この光パルスをInAsバルク半導体に入射し、1THz程度のテラヘルツ波の発生を確認した(図4(b))。上記超短パルス光源から得られた近赤外光パルスをテラヘルツ波へ変換するための高効率テラヘルツ変換素子として、周期分布反転型ニオブ酸リチウム(PPLN: periodically-poled LN)導波路の開発を行った。高い変換効率実現のためには、導波路損失が低いことが求められるが、実際の試作により $<0.5\text{dB/cm}$ (@ $1.55\mu\text{m}$ )という低い導波路損失を実現した。また、産学との連携により超小型テラヘルツ波プローブを開発し、検出可能周波数について従来マイクロ波帯までであったものを3THzまで検出可能であることを示し、その成果が新聞や雑誌に掲載された(図5)。

新たな半導体材料として期待される酸化ガリウム( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ )トランジスタについては、本年度途中の10月から研究室と独立した重点プロジェクトを立ち上げ、研究の加速を図っている。昨年度のトランジスタ(MESFET)の動作実証に続き、より実用性の高いMOSトランジスタの研究開発を現在進めている。その第一歩として、本年度は単結晶 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 基板上に原子層堆積法(ALD)により $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜を堆積した $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ MOSダイオードを作製し、その界面特性を評価した。図6に示すようにヒステリシスも観察されず、理想特性カーブに一致する非常に良好な容量-電圧(C-V)特性が得られた。これは、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ 界面準位密度が小さく、良好な界面が形成されていることを示唆している。また、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 中へのイオン注入によるキャリア濃度制御、低コンタクト抵抗オーミック電極の作製などのプロセスの開発にも成功した。今後、本年度新たに開発したプロセスを駆使して、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ MOSトランジスタの作製、動作実証へと研究開発を進めていく。

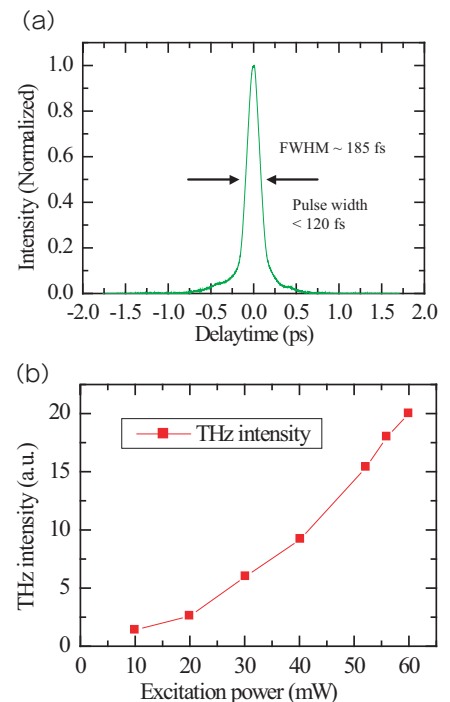


図4 (a)増幅後 $1\mu\text{m}$ 帯モードロックパルス(自己相関波形)と(b)テラヘルツ発生強度の励起パルス光強度依存性

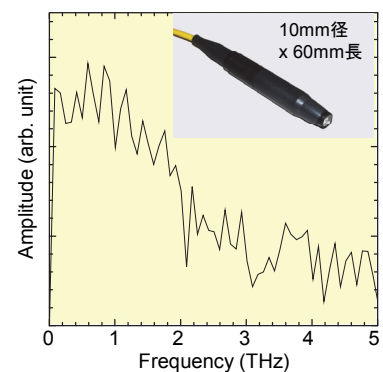


図5 検出したテラヘルツ波スペクトル(挿入図:超小型プローブの外観写真)

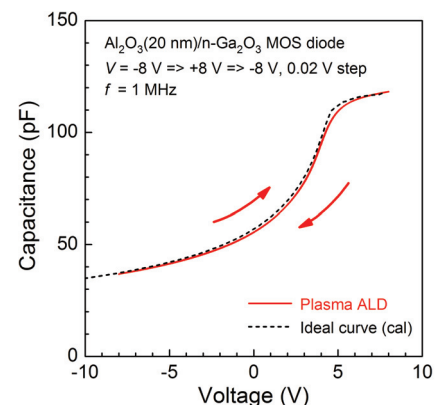


図6  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ MOSダイオードのC-V特性