

3.6.1 未来 ICT 研究所 超高周波 ICT 研究室

室長 寶迫 巖ほか 10 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 23 年度は、半導体トランジスタ及び小型テラヘルツ帯光デバイスの高性能化に向けた技術開発を実施するとともに、220GHz までのデバイス特性計測が可能な超高速信号測定環境を整備した。さらに 1THz 付近の周波数コム発生に必須のコンパクトな光パルス光源の開発を行った。特に通信波長帯半導体レーザを用いた変調器ベースのパルス光源と $1\mu\text{m}$ 帯のファイバレーザによる短パルス発生を実現した。また、実際の THz コム発生に必要な、THz 帯変換素子としての光伝導アンテナ開発及び非線形光学材料の探索を行った。

【平成 23 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 23 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を実施するとともに、220GHz までのデバイス特性計測が可能な超高速信号測定環境を整備した。

高速・低雑音が利点のインジウム・リン (InP) 系トランジスタについて、歪み半導体層のエネルギー帯構造とチャネル層 2 次元電子ガス解析を考慮したモンテカルロ法デバイスシミュレーションの実現に成功し、より一層の高速化が可能な複合チャネル構造トランジスタに適用した。ゲート長の微細化に伴う動作可能周波数の向上の程度を明らかにし、今後の世界最高速レベルのトランジスタ実現に関する指針が得られた。高耐圧・耐熱・耐放射線性に優れる窒化ガリウム (GaN) 系トランジスタについては、MIS (Metal Insulator Semiconductor) ゲート構造においてゲート絶縁膜を 2.5 nm まで薄膜化することにより高周波特性を向上させ、遮断周波数 $f_T = 223$ GHz、最大発振周波数 $f_{\text{max}} = 240$ GHz (ともにデバイス動作可能な限界周波数の指標) を得ることに成功した。また、ゲート絶縁膜を取り除いたショットキーゲート構造についても特性を評価し、エンハンスメントモードに近い電流-電圧特性を得るとともに、200 GHz を越える f_T, f_{max} を得ることに成功した ($f_T = 214$ GHz, $f_{\text{max}} = 267$ GHz)。

先駆的な成果として、酸化ガリウム (Ga_2O_3) 電界効果型トランジスタを新たに開発し (図 1)、その動作実証に世界で初めて成功した (図 2)。 Ga_2O_3 は、その優れた材料物性、大型単結晶基板を簡便、安価に生産可能であることなどから、高耐圧・低損失なパワーデバイス用途の新しい半導体材料として非常に有望であるにもかかわらず、その研究開発はこれまで全くの手付かずであった。現代の省エネルギー問題に直接貢献することができる新しい半導体デバイス研究開発分野であると同時に、近い将来の半導体産業のさらなる発展に一翼を担う分野になると期待される。

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 までのデバイス特性計測システムを整備し (図 3)、導波管部品について評価を開始した。NTT、富士通とのコア-アライ

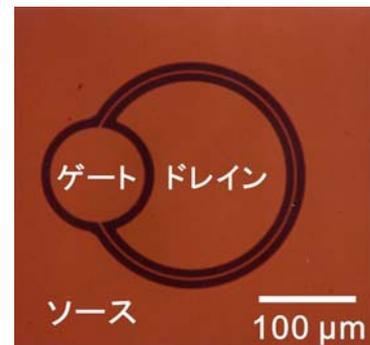


図 1 酸化ガリウム (Ga_2O_3) 電界効果型トランジスタの顕微鏡写真

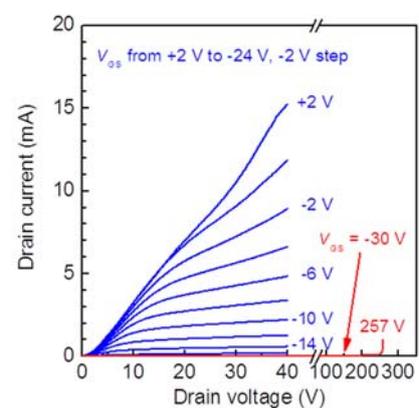


図 2 酸化ガリウム (Ga_2O_3) 電界効果型トランジスタの電流-電圧特性

アンスを構築し、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に着手している。

また、総務省から技術試験事務「マイクロ波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、無線伝送実験等を実施した。マイクロ波固定回線は防災無線等で中核的役割を担っているが、従来は屋外のアンテナと無線機室に設置された送受信機を長大な導波管を介して結合していた。本検討は、アンテナ直下の屋外に送受信機を設置しこれらを直結することにより電波の有効利用や消費電力の削減、耐災害性の向上を企図したものである。送受信機を屋外設置する際には外気温の変化に対する特性の安定性が最大の課題だが、NICTで研究開発を主導している GaN 系 HEMT が高温下でも動作可能な素子として本検討における無線伝送実験の送受信機（図4）に採用された。

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について、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。

テラヘルツ帯の周波数コム発生においては、光パルス光源の開発が必須であるが、実応用を念頭に置いた場合、ファイバレーザベースの光パルス光源が、コンパクト・メンテナンスフリーという点で適している。そこで、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の開発を行った。システム中のフィルタを適切な構成にすることにより、200 GHz 以上の周波数可変帯域を有するチューナブルテラヘルツパルスの発生に成功した（図5）。また、高出力特性が期待でき、かつテラヘルツ光への変換に用いる光伝導素子への波長整合性の良い $1\ \mu\text{m}$ 帯のイッテルビウムドープファイバレーザの開発にも着手した。ファイバ中の非線形偏波回転 (NPR: Nonlinear Polarization Rotation) 効果を用いることにより、パルス幅 3.9 ps のモードロック発振に成功した（図6）。まだ端緒に着いたばかりであるが、さらなる短パルス化によりフェムト秒パルスを得るための指針も得ている。

上記はテラヘルツ光変換前の光源についての開発であるが、テラヘルツ光への変換素子についても開発を進めており、今年度はテラヘルツ変換素子としての非線形結晶に注目した。非線形結晶としては高い変換効率が期待できる周期分布反転型ニオブ酸リチウム (PPLN: periodically-poled LN) を使い、かつパワー密度を高くできる導波路構造について設計・試作を行い（図7）、光波に対して $<1\text{dB/cm}$ の低い導波路損を実現した。



図3 整備した 220GHz までのデバイス特性計測システム



図4 GaN 系 HEMT を用いた屋外設置送受信機

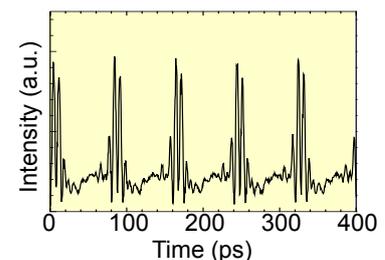


図5 チューナブルテラヘルツパルス（図は 60GHz 帯パルスの例）

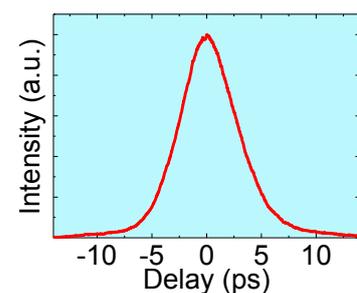


図6 $1\ \mu\text{m}$ 帯ファイバレーザのモードロック発振の様子（自己相関波形：パルス幅 $\sim 3.9\ \text{ps}$ ）

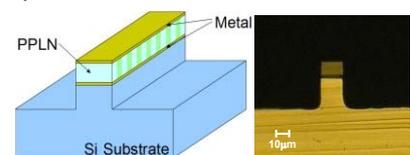


図7 テラヘルツ帯変換素子（周期分極反転型ニオブ酸リチウム導波路：PPLN）の概観と断面 SEM 写真