

### 2.14 超高周波 ICT 基盤技術

電波研究所時代から継続する NICT のミッションのひとつに電磁波の有効活用と未利用周波数の利用技術の開拓が挙げられる。独立行政法人通信総合研究所が発足した当時は、「テラヘルツ (THz)」すなわち  $10^{12}$  Hz 程度の電磁波が最後の未利用周波数帯として注目され始めた時期と重なる。それまで、周波数の低い領域からは、長波、短波、マイクロ波、ミリ波といった電子デバイス技術に基づく研究開発が実施され、周波数の高い領域からは X 線、紫外線、可視光線、赤外線などの光デバイス技術に基づく研究開発が実施されてきた。独立行政法人化以前の段階では互いが関連することは少なかった。テラヘルツ帯は、電子技術と光技術の中間の周波数に当たり、電子デバイス、光デバイスの両面から技術的なアプローチが行われるとともに、双方の技術が融合して成果をあげることも期待されるようになった。NICT では、これらの技術トレンドを受け、電子・光それぞれの技術に積極的に取り組むとともに、第2期中期計画からは同一の研究室(グループ)として統合した体制で研究開発に取り組んでいる。本稿では、第1期中期計画からの13年間に及ぶこれら「超高周波 ICT」に関する話題をまとめた。

#### 2.14.1 第1期及び第2期中期計画での研究開発

##### (1) テラヘルツ光源及びセンシング技術等の研究開発

第1期中期計画において、テラヘルツ帯「量子カスケードレーザ」を開発し、日本で初めてテラヘルツ帯でのレーザ発振に成功(平成18年3月6日報道発表)した。この成果により、作製が困難とされていた小型でコストを抑えたテラヘルツ帯における“レーザ光源”の実現見通しが得られた。この量子カスケードレーザは、ガリウムヒ素/アルミニウムガリウムヒ素系の半導体材料を用い、半導体の厚さを精密に制御しながら数百層あまりの多層膜を作り(図2.14.1(右))、電子の流れを巧みに制御できる量子カスケード構造を作製したものである。この量子カスケード構造を内部に持つ導波路の一方の端面に高反射ミラーを有する「ファブリー・ペロー型レーザ素子(図2.14.1(左))」を作製し、この素子を用いて3.4 THz

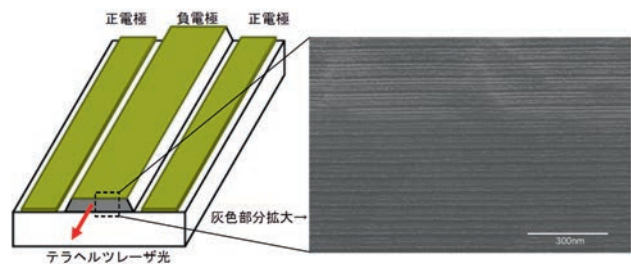


図2.14.1 (左)「量子カスケードレーザ」素子の見取り図(灰色部分が活性層、真中の活性層トップにある黄色ストライプは上部金属電極、その周りの2本の黄色ストライプは下部の金属電極。この間に電流を流してレーザ発振を得た。)(右)量子カスケードレーザ活性層の電子顕微鏡写真(多層膜が周期構造を成しているのが分かる。)

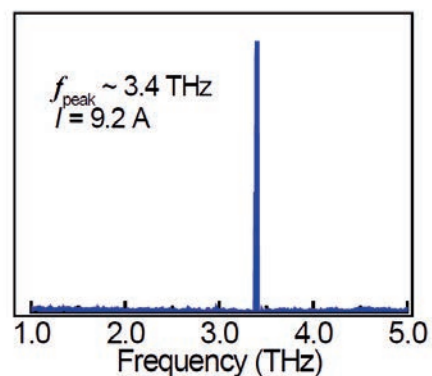


図2.14.2 量子カスケードレーザの発光スペクトル(図2.14.1の素子を約  $-250^{\circ}\text{C}$  に冷却し、電極間に9.2Aの電流を流した際に観測されたもの。レーザ発振に必要な電流(閾値電流)値を超えているため、レーザ発振を反映した鋭いスペクトルになっている。約3.4 THzのピーク周波数を持つ多モード発振が得られている。)

でのレーザ発振(図2.14.2)に成功した。

平成18~23年度には、テラヘルツカメラの開発及びテラヘルツ遠隔分光装置の開発を、委託研究「ICTによる安心・安全を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」によって実施した。中赤外に感度ピークを持つ非冷却マイクロボロメータアレイセンサ技術を改良し、テラヘルツ帯において、従来のもより2桁以上高感度なハンディ型実時間非冷却テラヘルツカメラの開発に世界で初めて成功(平成21年6月18日報道発表)し、商用化した。このカメラと自主研究で開発した液体窒素冷却のテラヘルツ帯量子カスケードレーザ光源システム(連続波出力10  $\mu\text{W}$ )を組み合わせ、模擬火災現場の高温の黒煙(5m程度)を透過して画像を撮影できることを確認(平

成23年3月8日報道発表(NEC))した。これらの成功を受け、諸外国の産軍共同体(例えば LETI(仏)、INO(カナダ)等)による同様なカメラ開発が一気に進んだ。国際競争力維持の観点から、第3期中期計画において画素数の拡大と更なる高感度化を目指した委託研究「THzギャップを埋める実時間 THz カメラの研究開発」(平成24～26年度)を実施中である。また、テラヘルツ波遠隔分光センシングシステムのプロトタイプを開発し、模擬火災現場において本システムの評価実験を行った結果、火災現場などで発生する危険ガスの一種とされる、シアン化水素ガスの遠隔検知に有効であることを検証(平成23年3月8日報道発表(NTT、独立行政法人産業技術総合研究所))した。

平成21～23年度には、テラヘルツ時間領域分光法のための超短パルス光源の開発を、委託研究「近接テラヘルツセンサシステムのための超短パルス光源の研究開発」にて実施した。自主研究において開発してきた光ファイバー通信用の高精度変調器(ニオブ酸リチウム結晶の電気光学効果を用いたマッハ・ツェンダー型変調器)及びこの変調器を利用した平坦な光コム発生器技術を民間に移転し、これらの技術に基づく超短パルス光源の研究開発を実施した。本光源はパルスの繰り返し周波数等の諸元を外部信号により制御でき、装置内に大きな共振器構造を持たないことから、高安定である。これまでにテラヘルツ帯時間領域分光法(THz-TDS)に用いられてきた超短パルス光源(チタンサファイアレーザ、モードロックファイバーレーザ)と比べ、制御性や安定性で優れており、またコストも抑えられるものとなっているため、今後の活用が見込まれている。

## (2) Ge:Ga ディテクタ技術の研究開発

Ge半導体中にGaをドープした外因性半導体(Ge:Ga)はGaのアクセプタ準位が10.8 meVであるためカットオフ波長115  $\mu\text{m}$ の光伝導型検出器として用いることができる。また、Ge:Gaに1軸性応力を加えることにより、荷電子帯での縮退が解けアクセプタ電離エネルギーは4.9 meVまで減少することが知られており、カットオフ波長は200  $\mu\text{m}$ まで伸長可能である。半導体検出器の中ではGe:Gaが遠赤外領域において最も高感度であるため、歴代の赤外天文衛星に搭載され数多くの成果を得ることに成功してきた。NICTは、平成18年2月22日に打

ち上げられた我が国初の赤外天文衛星 ASTRO-F(あかり)のFIS用検出器開発を担当した。

半導体遠赤外検出器は熱雑音を排除するため、3K以下の極低温で用いる必要がある。またASTRO-F以前の検出器は単一素子で用い、感度の増加のために検出器をキャビティに実装することが一般的であった。しかし観測の効率化・高精度化のためには検出器のアレイ化が必須であり、小型化を実現するためにキャビティを排除することが求められた。新たな重要開発課題として①キャビティを必要としない20×3素子高感度モノリシックアレイ、②極低温動作読み出し回路の使用、③検出器と読み出し回路のダイレクトハイブリッドの実現が挙げられ、遠赤外検出器では世界初となる試みである。検出器1つの受光面積は500×500  $\mu\text{m}^2$ であり、検出器に印加されるバイアス電界と光の入射方向が平行となるlongitudinal型を採用した。宇宙空間での観測時に高エネルギー粒子が検出器に衝突した場合、非線形な感度特性を示し、観測精度を著しく劣化させてしまうため、検出器自体を小体積で構築する必要がある。そのため電極間距離は500  $\mu\text{m}$ としたが、小体積は光吸収長の減少を意味し、高感度化のためには新機軸が必要であった。光吸収効率の増加にはアクセプタ濃度の向上が効果的であるが、素子全体で濃度を上げた場合、アクセプタ間のホッピング電流の増加を招き、検出器性能を劣化させてしまうことが問題であった。NICTでは、受光面と下部電極面にのみ高濃度のアクセプタドープ層を形成し、ホッピング電流を抑制しつつキャビティがない小型検出器でも14.6 A/Wという世界でもトップレベルの高感度検出器の実現に成功した(平成15年)。

極低温読み出し回路としては名古屋大学が中心に開発を進めたSi p-MOSを用いた電荷蓄積型アンプを使用した。この回路とGe:Gaの極低温下での熱収縮量は11  $\mu\text{m}$ 超であり、この歪みに伴う応力を低減が可能で、熱サイクルを経ても電気的かつ機械的に良好なコンタクトを保てる技術が必要であった。近赤外・中間赤外のアレイ素子では低温でも低いヤング率を有しているInを突起(bump)状に形成したものが用いられている。一方Ge:Ga遠赤外検出器では歪量が大きく通常のIn bump形成技術を適用することが難しいため、直径100  $\mu\text{m}$ のIn球を電極に並べ、50  $\mu\text{m}$ 程度まで押しつぶすようにしてbumpを形成した。これにより熱歪を緩和しつつ、

M-V ロケットによる打ち上げの振動にも耐える良好な接続技術を確立した(平成13年)。

このダイレクトハイブリッド遠赤外検出器アレイの最小エネルギー検出限界は  $5.6 \times 10^{-17} \text{ W}$  であり、衛星搭載用検出器としても世界最高レベルを達成した。ASTRO-F は JAXA により打ち上げられ(平成18年)、遠赤外領域での掃天観測に成功した(図2.14.3、図2.14.4)。

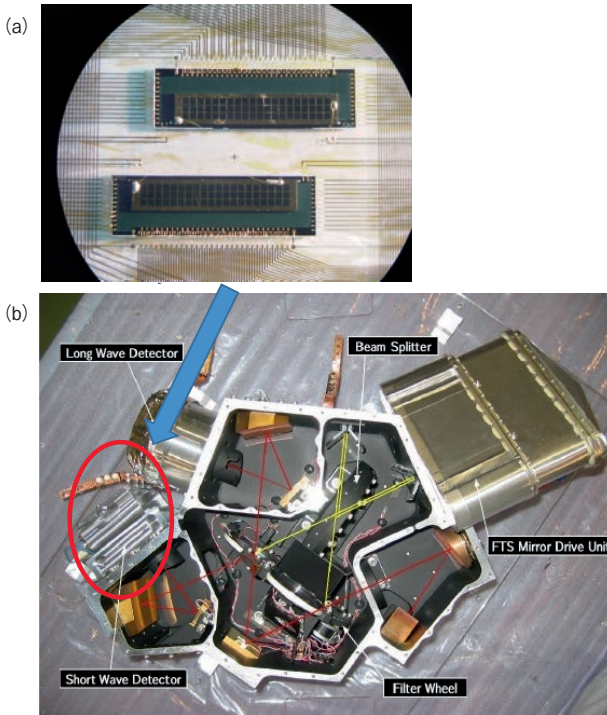


図2.14.3 (a) Ge:Ga ダイレクトハイブリッド遠赤外検出器アレイ写真 (b) FIS への実装

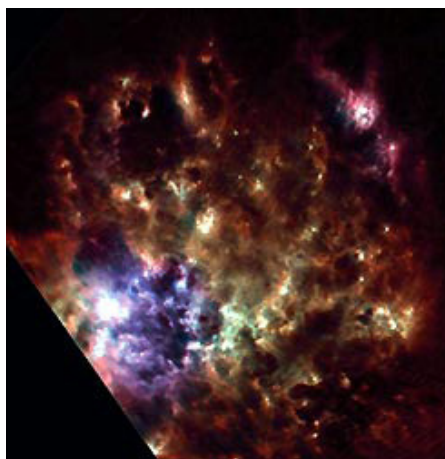


図2.14.4 FISによる大マゼラン星雲遠赤外線画像(60  $\mu\text{m}$ 、90  $\mu\text{m}$ 、140  $\mu\text{m}$  合成画像カラー合成) JAXA 提供

### (3) THz-TDS 技術の研究開発

第1期及び第2期中期計画において、神戸研究所では

主に THz-TDS 技術の研究開発を進めた。

20世紀末になって100 フェムト秒(fs)程度の光パルスを安定に出力することが可能なチタンサファイアレーザが広く使われ始めたことと併せて半導体結晶成長技術を利用する新たなテラヘルツ電磁波発生、検出技術が発達してきた。このような状況のもと、レーザ技術(主に超短光パルスレーザ)と半導体技術を駆使してテラヘルツ帯の基礎技術および応用技術の開発を行ってきた。

21世紀初頭には光伝導アンテナによって40 THzに達する広帯域検出が可能であることを示した。これは従来考えられてきた光伝導アンテナの検出帯域の上限を打ち破る画期的な報告であった。その後、光学系の整備と超広帯域光源の導入により、超広帯域検出の実証ステージへと進んだ。広い周波数領域のテラヘルツ波に対する応答を調べることは材料研究、デバイス研究に重要であり、その情報はデバイス等の性能向上に必須の情報である。

光伝導アンテナによる超広帯域発生・検出は、国立大学法人大阪大学との共同研究を進め、その検出帯域を着実に67 THz(平成16年)、100 THz(平成19年)に延ばし、170 THz(平成20年)に達した。

この結果をもとに10 fsのパルス光が出力される超短パルスレーザを用いて広帯域テラヘルツ波センシングシステムを製作し、実用に供するに至った(図2.14.5)。測定帯域は0.1~15 THzをカバーしている。この検出帯域を活かして気体のテラヘルツ帯の吸収測定等を行った。



図2.14.5 広帯域テラヘルツ波センシングシステム 真空を保持できる金属箱の中にテラヘルツ電磁波の発生検出光学系が配置してある。

一方で、広帯域のアンテナ検出を活かすことで、半導体多重量子井戸中の縦波光学フォノン(LOフォノン)からのテラヘルツ電磁波放出が狭帯域化されていることを実験的に示した。超短パルス光技術の発展によって、半

導体のバンドギャップよりも大きなエネルギーを持つ超短パルス光を照射することで、2つの現象が起きることが知られていた。1つは、過渡電流によるテラヘルツ電磁波の発生、もう1つは、構成原子が一様に振動する、いわゆるコヒーレントフォノンの発生である。反転対称性が破れている界面を多数備えた半導体多重量子構造を用いることでコヒーレントフォノンからのテラヘルツ放射増強を目指し、大阪市立大学のグループと NICT 小金井との三者による共同研究を行った。量子井戸を構成する GaAs 結晶の LO フォノンの周波数に一致するテラヘルツ電磁波が発生し、GaAs エピ膜に比べて高強度の信号が発生していることを示した(平成17年)。さらに、励起エネルギー、量子構造を制御することで、発生条件の最適化を行えることを示し、LO フォノン領域の高強度光源としての可能性を示した(平成20年)。

また、電気光学効果によるテラヘルツ電磁波の発生及び検出において詳細な計算と実験を行い、実験結果を計算結果が十分に説明できることを示した(平成19年)。

ドイツとの共同研究では、市販の半導体レーザのキャビティを拡張し、回折格子とV字型ミラーを組み合わせることで2波長の同時発振を可能とし、その2つの発振線の差周波としてテラヘルツ電磁波を発生することに成功した(平成16年)。しかも、そのV字型ミラーを移動させることで差周波数を制御することを可能とした。本研究は、新たなCW光源として注目を浴びた。

注目を浴びつつあったテラヘルツ電磁波を用いた研究開発は、継続的に国内外の研究機関を共同研究という形で巻き込みながら、測定ノウハウを蓄積し、テラヘルツ波による様々なデバイス、有機・無機材料の評価を進め、テラヘルツ電磁波の有用性を示し続けた。

#### (4) ミリ波デバイス技術の研究開発

独立行政法人化する以前からミリ波デバイス技術に関する研究開発については継続して取り組んでいたが、第1期中期計画前後において、高い電子移動度を持ち高周波特性に優れるインジウム・リン(InP)系HEMTについて重点的に研究開発を実施した(図2.14.6)。その結果、デバイス構造の改善(短ゲート化、低抵抗化、寄生容量低減等)により画期的な成果が得られ、平成12年から平成18年頃にかけて、遮断周波数 $f_T$ として300 GHz後半から560 GHz超級という当時のHEMTとしての世界最

高速記録を更新し、ミリ波実用化の基盤技術となる電子デバイス技術面から足場を確保する重要な役割を果たした。

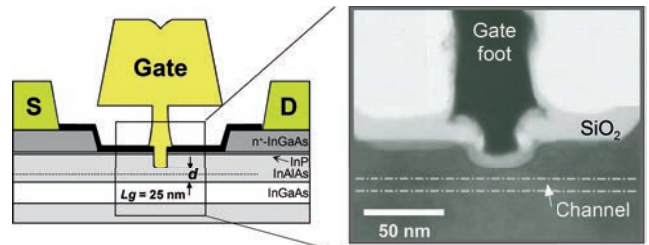


図2.14.6 InP系HEMTの断面構造と写真

さらに、平成16年からは、高耐圧・耐熱・耐放射線性に優れ、かつミリ波、テラヘルツ波帯で高出力が期待される素子として注目された窒化ガリウム(GaN)系トランジスタの研究に着手した。平成17年には $f_T$ として190 GHzという当時の世界最高速記録を達成した。GaN系素材のミリ波帯での実用化に向けた先陣を切り開き、世界のGaN系HEMT研究を先導する役割を果たした。これら素子開発と並行して、ミリ波応用に向けたデバイス評価技術、回路設計技術面でのHEMTの基礎特性評価に関する研究、及び無線装置化に向けた研究を進めた。

一方、平成14年2月の米国FCCの発表に端を発する超広帯域無線周波数利用技術に係る世界的な動きに対応し、平成15年に超広帯域(UWB)デバイス技術研究に着手した。平成16年には世界初のUWB-CMOS集積回路の試作開発に成功した(図2.14.7)。さらに、平成18年には、更なる超広帯域化と低電力化を用いる近距離通信技術としてsUWB技術の研究に着手し、電子デバイス、

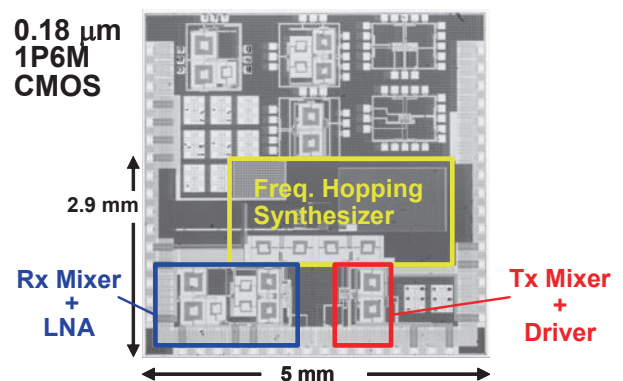


図2.14.7 UWB-CMOS集積回路の写真

無線装置化技術と組み合わせた近接場における共存型無線通信技術の開発により、周波数有効利用と、急速な需要拡大が予想される近接場通信技術の創生に向け研究を行った。

近距離無線技術に関連する端末技術として、発振器が空間との結合を持つ放射型発振器(図2.14.8)の構成を用い、準ミリ波～ミリ波、テラヘルツ波の領域で低電力消費と高効率を達成でき、小型低コスト化に適した新しい無線装置の研究開発を進めた。それらの技術を基に、無線ネットワークシステム、センサ技術の基本技術を確立し、更に小型軽量高効率の超広帯域 sUWB インパルス無線技術の基本技術の開発について平成23年頃までに成功した。

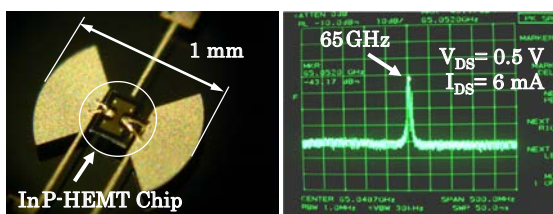


図2.14.8 高効率ミリ波無線放射装置と65GHzの直接発振放射出力

一方、超伝導磁気シールド型脳磁計技術の改良にも取り組み、世界最高性能のSQUID脳磁計技術に到達し、データ解析手法の研究を進め、ダイナミックな脳神経活動部位の時系列追尾を可能とし、脳神経ネットワーク機能の計測評価のための最先端技術を平成23年頃までに確立した。

また、全研究期間を通じ外部研究機関との協力関係を維持しながら研究を進めてきた。特に、ミリ波アンテナ及びシステム技術、デバイス雑音の研究、無線モジュールの小型高性能化、並びに各種の素材技術、試験評価技術について多くの外部機関との連携の下に研究を進めた。

## 2.14.2 第3期中期計画での研究開発

第3期中期計画では、それまで培ってきた超高周波ICTに関連した研究開発を継続・発展させ、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。

### (1) 超高周波基盤技術の研究開発

ミリ波、テラヘルツ波帯の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、システム技術に関する研究を行っている。

GaN系トランジスタについては、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を作製し(図2.14.9)、InAlNバリア層を5 nmから3 nmに薄膜化することで約1.5倍の相互コンダクタンスを得ることに成功した。600 mS/mmを超える相互コンダクタンスとともに200 GHzを超える遮断周波数 $f_r$ 及び最大発振周波数 $f_{max}$ を得ており、100 GHz超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(平成26年)。

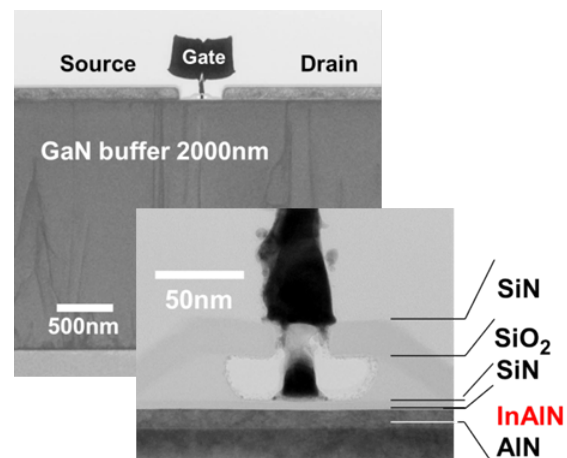


図2.14.9 GaN系HEMTの断面写真

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20 nm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(平成25年)。

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低温で成長したアルミニウム・アンチモン (AlSb) バッファ層を導入した半導体ウェハを作製し、これを用いてゲート長 50 nm の HEMT を試作し、170 GHz を超える  $f_T$  の達成に成功した (平成 25 年)。さらに、新しい SiGe 系素材を用いたデバイス技術の開発に向け、スパッタ成膜技術を用いた革新的な積層構造制御技術の開発を進めてきた。今後、高性能デバイス化技術研究による成果が期待される。

電子デバイスに関する先駆的な取組として、酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) 電界効果型トランジスタを新たに開発し (図 2.14.10)、その動作実証に世界で初めて成功した (平成 24 年)。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  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更なる発展に一翼を担う分野になると期待される。

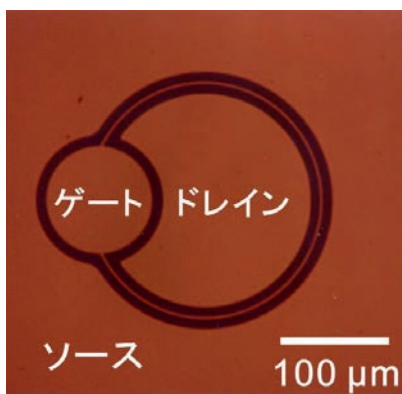


図 2.14.10 酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) 電界効果型トランジスタの顕微鏡写真

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 325 GHz までの導波管部品計測環境の整備を完了し、測定精度について評価を実施した。また、オンウェハ・プロービング計測環境の構築にも着手した。増幅器、アンテナ等が作製される同一基板上にインピーダンス標準基板を設計・形成し、これを用いて、一般的に用いられている SOLT 法に替わり、超高周波で精度が良いとされている TRL 法を実

証した。さらに、InP 系 HEMT の S パラメータ、遮断周波数を評価し、超高周波領域でのオンウェハ・プロービング測定への応用の可能性を示した (平成 25 年)。

システム技術に関連して、平成 23 年から 5 年計画で NTT、富士通株式会社と共同で総務省から「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、300 GHz 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。また、平成 23・24 年度には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」を受託した。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 2.14.11) に採用された。屋外設置型のマイクロ波無線装置の 4 か月にわたる長期フィールド試験を実施し、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実証した (平成 24 年)。

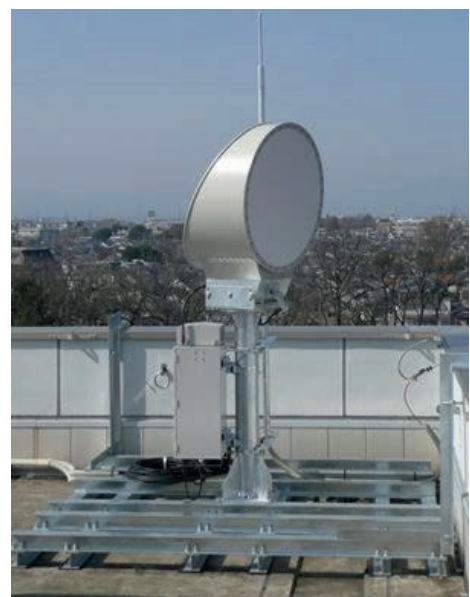


図 2.14.11 GaN 系 HEMT を用いた屋外設置送受信機

## (2) 超高速無線計測技術の研究開発

第 3 期中期計画では、これまで培ってきたミリ波・テ

ラヘルツ帯の技術 (特にデバイス技術) をベースに、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の研究開発を推進してきた。特に、周波数計測応用で重要となるテラヘルツ帯の周波数コムに着目し、研究開発を実施している。

テラヘルツ帯の周波数コムの生成に当たっては、光技術をベースとしたコム発生を念頭に置いており、その場合、テラヘルツ波発生に用いる励起光としての近赤外領域のパルス特性が非常に重要である。さらに、汎用性を鑑み、コンパクト性・メンテナンスフリーの観点から、これまで①1.55  $\mu\text{m}$  の通信波長帯半導体 CW 発振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、及び②1  $\mu\text{m}$  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点に着目して研究開発を行ってきた。さらにこれらを用いてテラヘルツ波を発生・検出するための光-テラヘルツ変換素子についても研究開発を行っている。

①については、図2.14.12のように CW 発振レーザをニオブ酸リチウムから作製したマッハ-ツェンダー型 (MZ) 変調器に入射し、MZ 変調器のアームに RF 信号を印加することにより光周波数を中心に、RF 周波数分だけ離れたサイドバンドを発生させ、いわゆる光周波数コムを生成する。しかし、このままでは時間領域でピコ秒程度のパルスであるため、MZ 変調器の後段に、分散補償ファイバー・光増幅器・高非線形ファイバーを配置することにより超短光パルス、周波数領域で言えば広帯域の光周波数コムを生成する。これまでに、MZ 変調器の高性能化、使用する光ファイバーの最適化などにより 3 THz に及ぶ帯域を有する光周波数コムが得られた (平成24年、図2.14.13)。一方、帯域の他にもテラヘルツ波発生のためには光パルス強度が高い尖頭値を有することが望ましいため、チャープパルス増幅法による高ピークパワー化にも着手した。その結果、単一変調器の簡便

な構成で、広帯域という特性を維持しつつ、パルス幅 280 fs、ピークパワー 2.5 kW の高強度・超短光パルス発生を実現した (平成25年、図2.14.14)。

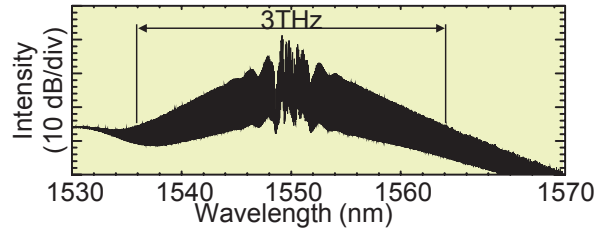


図2.14.13 3THz 帯域を有する光周波数コムスペクトル

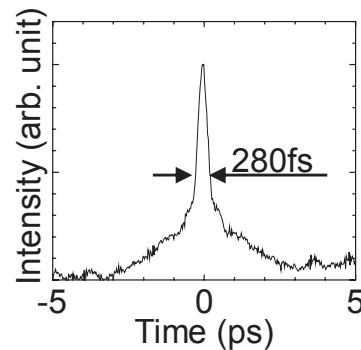


図2.14.14 高ピークパワーパルスの自己相関波形

②に関しては、イッテルビウムドープファイバーの高利得性による高出力特性や、光-テラヘルツ変換素子として光伝導アンテナ素子を考えた場合、励起波長の観点からの整合性の良さが期待できるという点が特徴として挙げられる。

イッテルビウムファイバーレーザのモードロック発振実現のために、リング型ファイバーレーザの構成を採用し、ファイバー中の非線形偏波回転 (NPR) 効果を利用した。これにより、120 fs 以下の幅を持つパルス発振が得られた。また、更なる高出力化のために独自に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を開発した。これにより、フェムト秒 (~ 200 fs) の短パルス性を維持したまま、高い出力 (W 級) の出力パルスを得ることに成功した (平成25年、図2.14.15)。

上記の2種のパルス光源システムの研究開発は引き続き行っているが、同時に光-テラヘルツ変換部分についても並行して進めている。1つはファイバーベースの 1  $\mu\text{m}$  帯パルスと非線形光学結晶の組み合わせによるテ

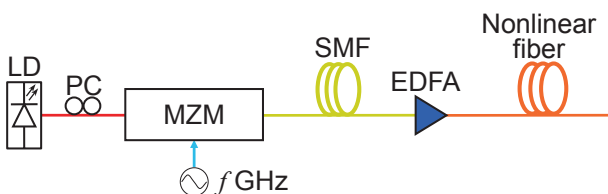


図2.14.12 MZ 変調器ベースパルス光源システムの構成図

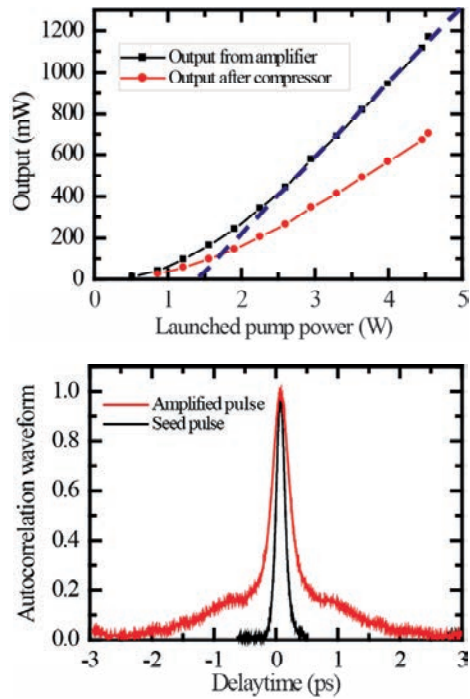


図2.14.15 1  $\mu$  m モードロックファイバーレーザーパルス増幅特性(上: 増幅後光出力、下: パルスの自己相関波形)

ラヘルツパルス発生である。現在のところ、非線形光学結晶にガリウム・リン結晶を用いると、約3 THz のスペクトル帯域を有することが判明しており、更なる最適化を目指している。また、変調器ベースの1.55  $\mu$  m 帯光周波数コムについては、通信波長帯の充実した光学部品をうまく利用することにより、200 GHz 以上の周波数可変域を有するチューナブルテラヘルツパルスや、2本のコム抜き出しと単一走行キャリアフォトダイオードの組み合わせによる700 GHz 帯のCW テラヘルツ波発生に成功した(平成25年)。特に、この700 GHz 帯テラヘルツ波は、簡易な構成で  $10^{-11}$  台(1秒平均)の周波数安定性が得られており、安定度の高いテラヘルツ波生成が出来ていることが示された(平成25年、図2.14.16)。

一方、テラヘルツ波の発生のみではなく、その検出についての検討も産官連携で行っている。ここではテラヘルツ分光・センシングのユースケース拡大を目指して超小型テラヘルツ波プローブを開発しており、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3 THz まで検出可能であることを示した(図2.14.17)。本成果は新聞や雑誌に掲載された(平成24年)。更なる高性能化を目指して研究開発を引き続き進めている。

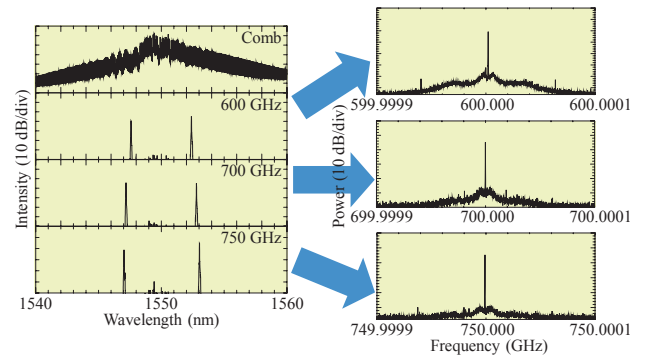


図2.14.16 変調器ベース光周波数コムから抜き出した2本のコムスペクトル(左)と変換後の700GHz 帯テラヘルツ放射スペクトル(右)

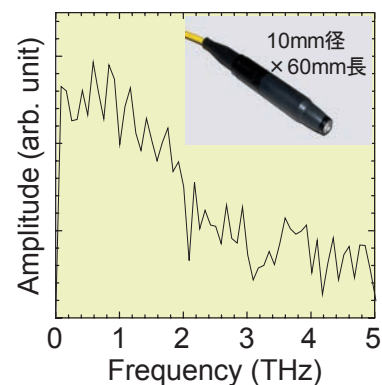


図2.14.17 超小型 THz プローブの写真とスペクトル