

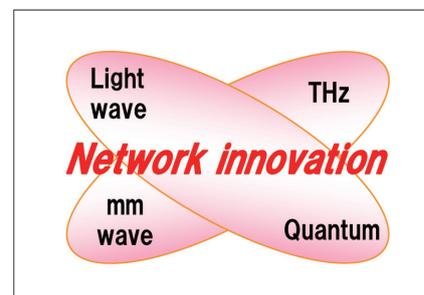
### 3.2.3 新世代ネットワーク研究センター 光波量子・ミリ波ICTグループ

グループリーダー 土屋昌弘 ほか38名

#### 基盤的ネットワークハードウェア技術の研究開発

#### 概要

光と無線は情報通信ネットワークを支える基本的媒質である。これらを制御し利活用する手法に対して、イノベティブな基盤技術の創出及びそれらのネットワーク適用の具現化、これらを目標に研究開発を進めている(右図)。以下の主題二つを掲げ、関連課題に注力しつつ境界領域の先駆的開拓も併せて実施する。



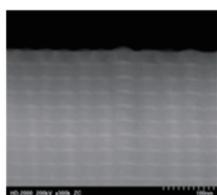
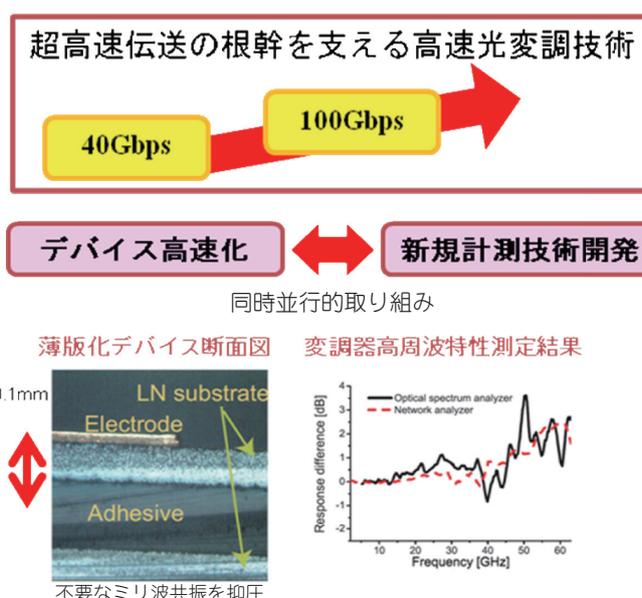
- (1) 光波や量子という光の極限特性の活用手法を創成し、将来の光情報通信インフラの要素技術を開発する。
- (2) 未開拓無線周波数帯であるテラヘルツ帯・ミリ波帯を開拓し、未来の無線ICTに向けた周波数資源の拡大拡充のためのハードウェア技術を開発する。

#### 平成19年度の成果

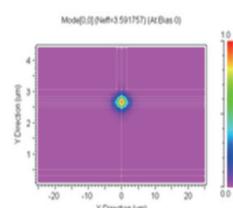
##### (1) 光波技術の研究開発

光ネットワークの基盤と位置付けられる光波デバイスとその活用技術及び光オールバンドシステムに関する研究開発を実施した。

情報操作量250Gb/s級光変調デバイス技術と変調方式の開発(右図)において、ミリ波帯周波数特性評価方法の開発と薄版化光変調デバイスによる高周波特性の改善を行った。これにより、87Gbaud (DQPSK174Gb/sに相当)での良好な動作を確認し、多値位相変調、直交振幅変調対応集積デバイスとしての世界最高速度を達成した。特性評価技術に関しては既存技術特性を大幅改善し、上限100GHz以上、誤差従来比50%以下の達成に目途がついた。また、世界最高速度16値光変調器の開発にも成功し、海外研究機関の報告がこれに追隨するなど多くの注目を集めている。



高密度、高品質量子ドット材料開発



導波路構造の設計(シミュレーション)

200nm機能光半導体デバイスの開発においては、低コスト大容量アクセス系の実現を目指す量子ドット発光材料の開発を行っている。量子ドットはナノメートルオーダーの半導体構造で、その適用によりアクセス系光半導体デバイスの性能改善が想定される(左図)。①発光効率の向上及び温度特性大幅改善による温度調節装置の廃止などの大幅消費電力削減の実現、②発光波長広帯域化によるレーザ部品共通化、所在庫の削減、③使用材料最適化による環境負荷の削減、資源ナショナリズムへの対応など、新世代ネットワークを支える上での重要な効果がもたらされると期待される。今年度は特に1500nm波長帯での要素技術開発、高密度量子ドット技術の半導体レーザへの適用検討に注力した。現在、試作途上であるが、量子ドット材料最適化、導波路構造設計などを進めている。

帯域100THz級の超広帯域光源技術の研究開発においては、光通信及び赤外域での光周波数基準応用に向け、光学的高非線形媒質を用いる光波帯域30THz級光源を開発した。独自の光ファイバ超広帯域光発生技術、変調器ベースの高安定パルス信号・周波数コム発生技術により、超広帯域性、波長可変性、周波

数可変性、安定性などを兼ね備えた光源を実現した。国内外研究機関から問い合わせがあり、連携も進むなど、実用化に向けた取組にも進展が見られる。また、高繰り返し(10GHz) 200fsパルス発生を達成した。なお、周波数コムとは一定間隔を有する線状周波数スペクトルの集合体で、広帯域信号を表す。

また、NICT内戦略的研究開発スキームによるオールバンドフォトニクス輸送システム基盤研究に注力している。利用可能帯域性に優れ低消費エネルギー・低コスト・高性能半導体光デバイス利用が期待される光波長1ミクロン帯について、世界に先駆けて着目し、その光伝送システム開発とその高度化を行った。特殊設計光ファイバによる低分散伝送路の可能性の検討を行い、東北大学との共同研究を通じて1ミクロン帯モード同期半導体レーザープロトタイプの内製製作を実施した。その結果、10Gb/s・7kmエラーフリー伝送が実証され、1ミクロン帯情報通信可能性の端緒が開かれた。高度な光波技術を応用する対象として光によるミリ波・マイクロ波信号を測定する技術に着目し、高速の電気信号を瞬時に映像化する装置「電界カメラ」を試作した(右上図)。光波超並列性によりマイクロ波信分布1万点号同時測定を可能し、動画としてその場で映し出すことに成功した。図は小型軽量化を図ったモデルであり、設置面積A4紙大である。マイクロ波アンテナ特性解析、回路不良診断などへ新次元の機能がもたらされると期待される。

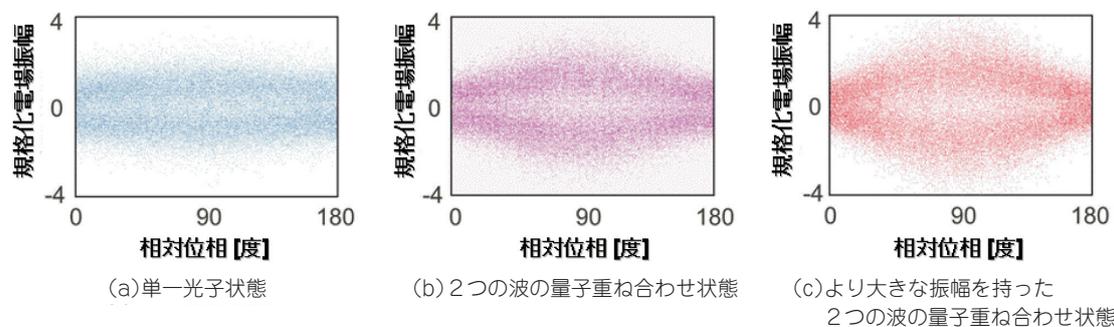


## (2) 量子情報通信技術の研究開発

極限的安全性と大容量伝送を実現する量子情報通信ネットワークの実現に向けた研究開発を実施した。基盤技術の開発と新原理の開拓、特に、光波制御技術の枠内にとどまる現在の光通信技術と、少数光子の制御の範囲内にとどまる現在の量子情報通信の間に横たわる溝を埋め、革新的情報通信パラダイムを創成するために新たなスキーム「光波光子統合制御」の開拓に取り組んだ。

まず、基盤技術である光子検出について、半導体光子数検出器の量子効率及び光子数識別レンジを改善に取り組み、量子効率90%及び光子数識別レンジ11～12光子を達成した。また、フィードバック型電荷蓄積増幅回路を用いて光電子増倍率分布の高精度測定システムを構築し、従来比200倍以下の低増倍領域の測定を実現した。

量子ネットワークノード技術の基盤構築のために、光子と物質(イオン)のそれぞれの量子状態の相互制御技術の研究開発を進めた。共振器長 $L = 6\text{mm}$ の低損失微小共振器内を開発し、5個以上のCaイオンを結合させる小型イオントラップを開発し、動作確認に成功した。



光波光子統合制御を実現に向けて、スクイーズド光に光子検出器による測定誘起型非線形操作を施す技術確立した。これによって単一光子状態の生成や、異なる二つの波が同時に存在する量子力学的な重ね合わせ状態の自在な生成が可能になった。上図(a)は単一光子状態の電場振動の観測結果である。2本の帯の位置が光子1個の電場振幅に相当する。「光子が1個」とエネルギーが確定すると、波の位相(山と谷の位置)は逆に完全にランダムになり時間に依存しない2本の帯になる。(b)と(c)は、スクイーズド光の強度を上げ光子数を増やしていった場合の変化で、山と谷を持つ波の性質が現れてくる。特に、横軸の同じ時間位置に山と谷が同時に現れており、位相が180度ずれた二つの波の状態が重ね合わさっていることが分かる。このような重ね合わせ状態を用いることで、従来にはない超並列信号処理や高精度計測が可能になる。

半導体素子による量子制御は量子技術実用の上で極めて重要であり、長期的課題として取り組む必要がある。その実現に向けて、通信波長帯高品質量子ドットを作製し、励起子状態の量子重ね合わせに起因するラビ振動の制御に成功し、光-電子間での相互制御技術への端緒を開いた。

また、量子暗号標準化に向けた国際会議(Updating Quantum Cryptography2007)を情報処理推進機構と産業総合技術研究所とで共催したほか、量子ICT運営会議を主催し、国内外の効果的な連携を先導した。

## (3) テラヘルツ帯電磁波制御技術の研究開発

未開拓周波数帯電磁波の一つであるテラヘルツ波について半導体基盤技術を中心に研究開発を実施した。

テラヘルツ帯量子カスケードレーザ(右図)については、昨年度開発した熱圧縮法によるエピタキシャル結晶転写技術を応用した両面金属型低損失導波路によって、駆動電流パルスデューティー比を2けた程度改善し2.56%を実現した。

テラヘルツ帯高精度光源技術確立へ向けて、昨年度構築した光周波数コムを用いる狭線幅THz波システムにおいて、高精度なテラヘルツ光発生の基礎となる光コム発生帯域やビート信号精度を確認した。また、周波数ロックを実現した。

昨年度開発した超広帯域(15THz)テラヘルツ波分光装置の共同利用を新たに開始した。テラヘルツ帯材料分光データベースを古典西洋絵画材料に関して構築し、データベースを用いたテラヘルツ帯分光分析の有効性を報道発表・論文等を通じて世間に広報し好評を得た。その他の分野のデータもデータベースへ加え、データ数が250程度集まったものをインターネット上(<http://www.thz-spectra.com/>)で公開し簡単な手続きで利用できるようにした。

テラヘルツ帯の高度利用を実現するために必要不可欠なテラヘルツ帯大気伝搬モデルを確立するために、昨年度に初めて精密測定に成功したテラヘルツ域における水蒸気吸収線幅圧力係数を取り入れ、NICT大気伝搬モデルを再構築した。大気電波減衰定数は従来値に比較して10～15%低くなることを論文により報告したところ、この結果を追試する論文が発表され、値の確度を議論する基盤となった。今後進めるITU-Rへの伝搬モデル提案において重要な一歩となった。

## (4) ミリ波デバイスの研究開発

ミリ波帯高出力デバイスとして注目される窒化物トランジスタについてその格段の高速化を中心とする研究開発を実施した。超高周波化のための高Al組成障壁層を有する独自構造を提案しており、これによるGaNヘテロ構造電界効果トランジスタ(HFET)の開発を行った(右図)。ヘテロ構造とは異なる半導体が組み合わされた構造であり、その中の障壁層は電子を閉じ込めるための機能を有する。障壁層におけるAl組成を100%としたAlN/GaNヘテロ構造について電気的特性評価を行った結果、これまでに、AlN表面における保護膜の有無に応じて特性が制御されることを明らかにしている。保護膜を用いない状態では表面空乏化により二次元性を有する電子が蓄積されないのに対し、触媒化学気相堆積法を用いて製膜したSiN表面保護膜を用いた場合には、極めて高い密度の二次元電子が界面に誘起される。また、その電子密度はSiN表面保護膜の厚さの制御により調整可能である。今年度は、実際にシリコンカーバイド(SiC)基板上にて高Al組成GaN-HFET新規構造の作製を行った。高Al組成AlGaN障壁層及びAlNスペーサー層を有するGaN-HFET構造を成長し、電子移動度 $1900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、電子濃度 $1.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、シート抵抗 $200 \text{ } \Omega/\text{sq}$ の良好な電気的特性を得た。さらに、触媒化学気相堆積法(Cat-CVD)によるSiNゲート絶縁膜を有する60 nmゲートGaN-HFETを電子ビームリソグラフィ技術により作製し、世界最高の遮断周波数 $f_T = 190 \text{ GHz}$ を達成する(左図)とともにゲートリーク電流の低減と破壊電圧の向上を実現した。また、50～75 GHz帯の高電力域用の入出力特性評価システムを構築し、サファイア基板上に作製した50 nmゲートGaN-HFETにおいて最大電力密度 $0.35 \text{ W/mm}$  (50 GHz)を達成した。

