

3.2.3 新世代ネットワーク研究センター 先端ICTデバイスグループ

グループリーダー 寶迫 巖 ほか27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

光と電波は情報通信ネットワークを支える基本的媒質である。これらを制御し活用する手法に対して、革新的な基盤技術の創出とそれらのネットワーク適用への具現化、光と電波における周波数資源開拓（周波数利用効率の向上：光波帯・ミリ波帯、未利用周波数帯の開拓：ミリ波帯・テラヘルツ帯・光波帯（ $1.5\mu\text{m}$ 帯以外））を目標に研究開発を進めている。グループは3プロジェクト（光波デバイスプロジェクト、未開拓周波数（テラヘルツ）プロジェクト、ミリ波デバイスプロジェクト）により構成され、それぞれが世界トップと言える成果を輩出している。

平成20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に関する研究開発を実施した。

高速伝送実現を目指し、各種の高速変調デバイスの開発を行っている。図1に示す光回路内でのデジタル信号合成を可能とする新規デバイスを用いて50Gb/s 16値直交振幅変調（16QAM）信号の伝送に成功した。また、光変調デバイスのさらなる高速化とその特性評価方法の開発を進めている。光スペクトルによる高精度測定手法を提案し、これにより自らが提案した高精度光波制御技術（既成位相変調従来比1/10以下に抑圧）の性能の高さを実証した。さらに、今年度、高速光スイッチング技術デバイスの研究に着手し、新規光集積回路と制御技術により瞬間的な光の行き先切り替えを実現する光デバイスの開発に成功した。高速光スイッチングデバイス構造と光出力測定例を図2に示す。二つの入力と二つの出力を持ち、入力1と出力1、入力2と出力2が接続されている状態と、入力1と出力2、入力2と出力1が接続されている状態の2通りの切り替えを可能とする。切り替え信号入力と、切り替え精度向上回路を持つのが特徴で、切り替えに要する時間は測定の結果、26psであった。切り替え精度（消光比：希望信号と不要信号の比）従来技術比100倍、切り替え速度1,000倍以上（同様の材料を用いた商用光スイッチングデバイスとの比較）を達成した。これにより10Gbit/s高速信号を1bitも漏らすことなくガードタイムなしで切り替えが可能となることを実証した。

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レーザをはじめとする各種デバイス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（図3参照）で、その適用により光半導体デバイスの性能改善が想定される。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もたらされると期待される。また、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

世界初高速16QAM伝送実現

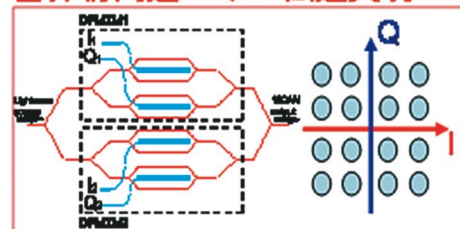
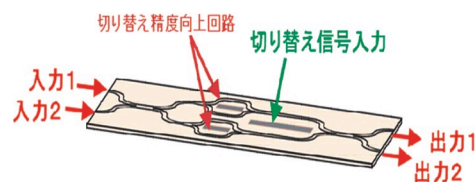


図1 光回路内でのデジタル信号合成を可能とする新規デバイス

高速光スイッチングデバイス構造



光出力測定例

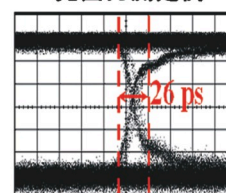


図2 高速光スイッチングデバイス構造と光出力測定例

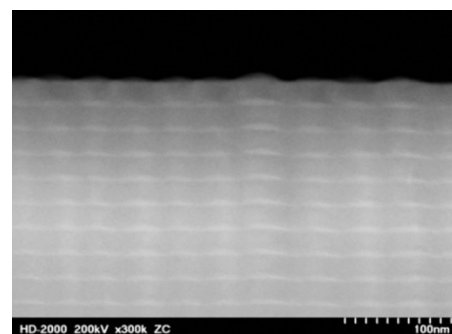


図3 量子ドット構造

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試作を実施した。その結果、10Gb/s・7kmエラーフリー伝送が実証され、1ミクロン帯での光伝送技術の端緒が開かれた。図4に伝送実験の装置構成を示す。図中のグラフは、ビット誤り率と復調信号波形を示す。伝送距離0km(BtoB)、4km、6.9kmで伝送特性測定を行った。それぞれで誤り率 10^{-9} 以下を達成した。

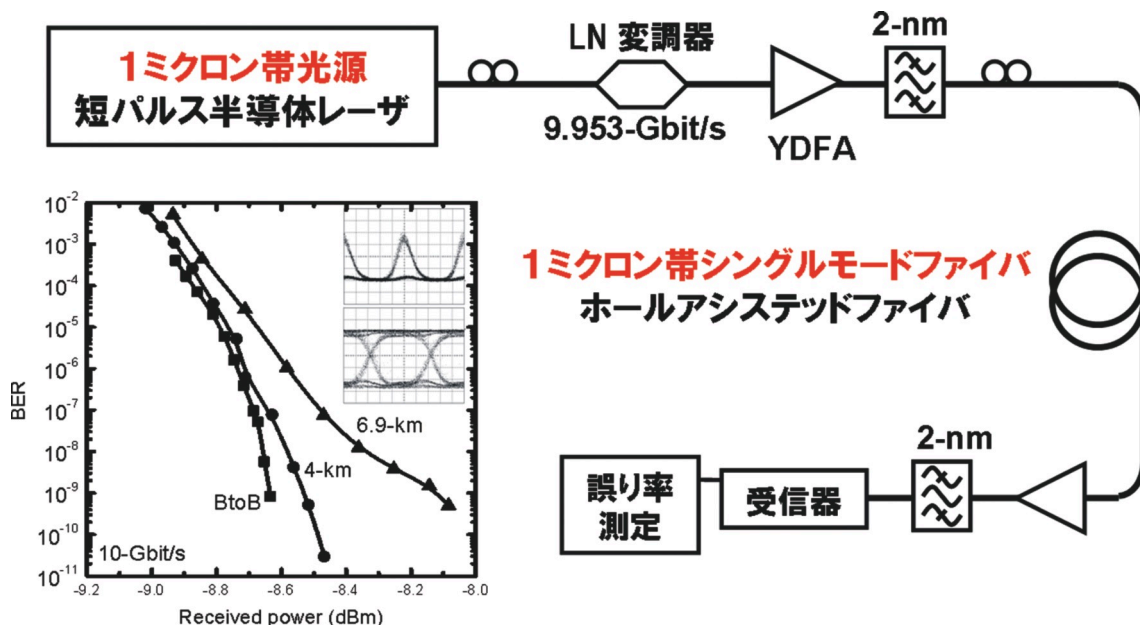


図4 1ミクロン帯での光伝送実験の装置構成

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60THz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。また、高繰り返し(10GHz)、短パルス(パルス幅200fs以下)発生を達成し、これらの技術の実用化への取り組みも積極的に進めている。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、光周波数基準、パルス発生源、多波長光源など幅広い分野への応用が期待される技術である。

(2) 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。昨年度までに開発してきたテラヘルツ帯量子カスケードレーザを用い、入手性の高い液体窒素による冷却によって動作する小型テラヘルツ光源を実証した。委託研究「ICTによる安全・安心を実現するためのテラヘルツ波技術の研究開発」の委託先であるNECと連携し、NECが開発した非冷却THz帯アレイセンサと組み合わせイメージングシステムを構成し第7回産学官連携推進会議等で展示を行った。図5はイメージングシステムの写真とこのシステムによるテラヘルツ帯イメージの撮像例を示している。絵画分析への応用では、絵具(青)の細かな分布の撮影に成功している。このときの空間分解能は230ミクロン程度であった。このイメージングシステムに関して外部からの問い合わせを多数いただいている。

テラヘルツ帯量子カスケードレーザ自体の高度化を目指した研究開発の一つとして、非平衡グリーン関数法を用いたテラヘルツ帯量子カスケードレーザの動作解析を行うシミュレーションプログラムを開発した。当プログラムは第一原理(仮定を含まない)に基づいており、今まで用いられてきたモンテカルロ法などのシミュレーションでは困難な電子-電子相互作用なども取り込んだ計算が可能



図5 イメージングシステムの写真とこのシステムによるテラヘルツ帯イメージの撮像例

になっている。そのため、テラヘルツ帯量子カスケードレーザの正確な動作解析ができるものと期待できる。従来、3準位系であった量子カスケードレーザ活性層に対し、図6は、4準位系レーザ構造を新たに適用した活性層内の200Kにおけるエネルギー分解電子分布を示している。200Kにおいても想定したとおりにレーザ発振の上準位（中心部赤の濃い部分）に多数の電子が存在し、レーザ発振の下準位に対して反転分布を形成している事が分かる。さらに、活性層内での局所ゲインを計算したところ（図7）、200Kにおいてもゲインが生じており（図中央：白が濃い部分）高温動作への設計が可能である事が見出された。以上の様に、デバイス設計の指針となるシミュレーション技術を構築できた事により、今後一層の研究開発の加速が期待できる。

テラヘルツ帯量子カスケードレーザの高速変調を目指した技術開発として、素子の母材の砒素化ガリウムのバンドギャップエネルギーより大きなエネルギーの近赤外光注入実験を行い、変調及び変調深さの入力光パワーに対する依存性（図8）は、光励起キャリアによるTHz波の吸収が原因であることを実証した。光による変調方式では、（寄生電気回路のC、R、L成分ではなく）光キャリアの再結合時間で決まるため高速変調に適している。

昨年度構築したテラヘルツ帯分光データベース（<http://www.thz-spectra.com/>）と理化学研究所テラヘルツ光研究グループが同じく昨年度に構築し公開したデータベースを統合・拡充し、インターネット上（<http://www.thzgb.org>）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。

また、(1)NICTからの提案により総合科学技術会議にて革新的技術の一つに「検知技術（テラヘルツ）」が選定された、(2)テラヘルツ技術動向調査を実施し、センサー応用、情報通信、標準の各分野に対するロードマップを作成した。(3)ITU-RのWP1A会合にて、WRC11議題1.6に対する寄与文章を入力した、など対外活動を実施した。

図9は小金井に整備されているテラヘルツ帯計測機器の年度別利用者数を示している。共同研究に基づき、外部（企業、大学等）からの利用も可能である。2008年度には年間利用者数が200人を越え、関西支所でのテラヘルツ帯計測機器の利用者数を足すと毎年300人程度となっており、NICTがテラヘルツ技術研究における地域のハブとして機能している事を示している。

(3) ミリ波デバイスの研究開発

ミリ波帯における高出力トランジスタとして注目される窒化物トランジスタの高出力化、高耐圧化を中心とする研究開発を実施した。GaN系高電子移動度トランジスタ（HEMT）の高周波特性と高出力特性の両方

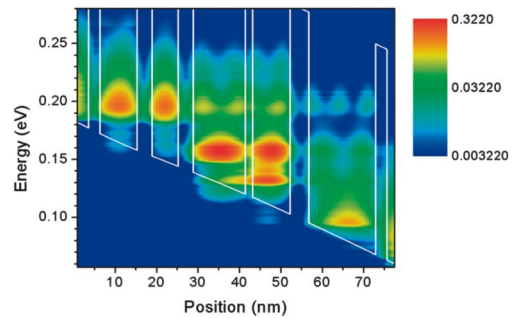


図6 4準位系レーザ構造を新たに適用した活性層内の200Kにおけるエネルギー分解電子分布

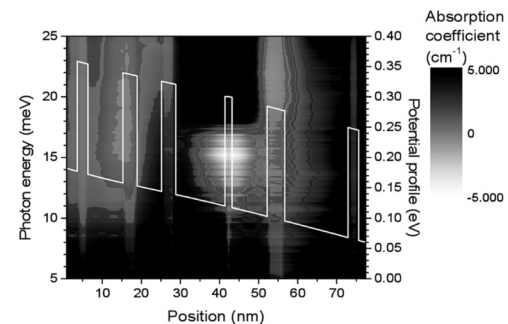


図7 活性層内での局所ゲイン

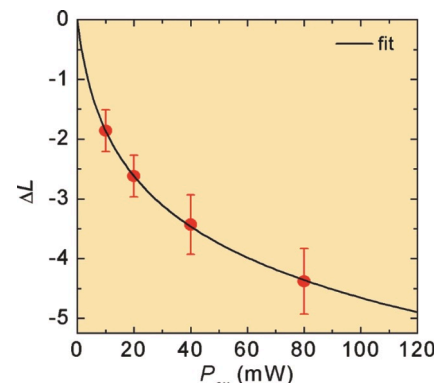


図8 近赤外光注入による変調深さ（ ΔL ）の入力光パワーに対する依存性

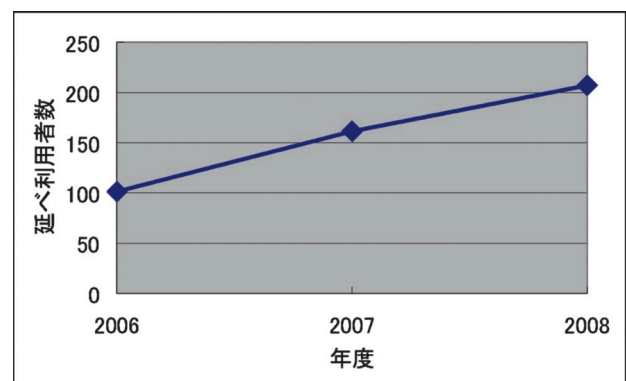


図9 小金井に整備されているテラヘルツ帯計測機器の年度別利用者数

を向上させるため、触媒化学気相堆積法 (Cat-CVD) による窒化シリコン (SiN) 膜形成技術を用いて 3 層ゲート絶縁膜を有する GaN 系 MIS-HEMT を炭化シリコン (SiC) 基板上に作製した。3 層ゲート絶縁膜は下層から SiN、SiO₂、SiN の順で構成され、最上層 SiN 膜は T 型ゲート電極の機械的支えとし、100nm 以下の微細ゲートの形成が可能である。中間層 SiO₂ 膜は最上層 SiN 膜の開口時のドライエッチングのプラズマダメージを吸収するとともにウェットエッチングにより完全に除去し、ゲートフット近傍をダメージフリーとする構造である。最下層 SiN 膜は AlGaIn 表面を安定化し、電流コラプスの抑制とともにゲート電極を最下層 SiN 膜上に形成し、MIS 構造とした。その結果、ゲート長 $L_g = 35\text{nm}$ 、ゲート幅 $W_g = 25 \times 2\mu\text{m}$ 、ソース・ドレイン間距離 $LSD = 2\mu\text{m}$ の GaN 系 MIS-HEMT において出力電力密度 1.07W/mm を周波数 60GHz にて達成した。一方、GaN 系 HEMT の高速化と高耐圧化に向けた構造の最適化により、 $f_T = 122\text{GHz}$ 、3 端子オフ耐圧 $BV_{OFF} = 110\text{V}$ を達成し、GaN 系 HEMT の高出力化及び高耐圧化を実現するとともに、ミリ波帯通信システム向き高出力増幅器及び高耐圧スイッチへの応用可能性を示した。

超広帯域ミリ波帯無線伝送システムの研究開発においては、70~100GHz 帯域で動作する低雑音増幅器モノリシック集積回路 (LNA-MMIC) の高利得・低雑音化に向け、インジウム燐 (InP) 系 HEMT の高 f_{max} 化を実施し、InP 系 HEMT において $f_{max} = 550\text{GHz}$ 、 $f_T = 450\text{GHz}$ を達成、更にこの InP 系 HEMT を用いた 3 段構成コプレーナ線路 (CPW) 型 LNA-MMIC ($1.43 \times 2.68\text{mm}^2$ 、図10) を作製し、利得 $G_a = 20.6\text{dB}$ 、最小雑音指数 $NF_{min} = 2.25\text{dB}$ を周波数 79GHz にて達成し、70~100GHz 帯における高利得・低雑音増幅器 MMIC の実現に成功した。

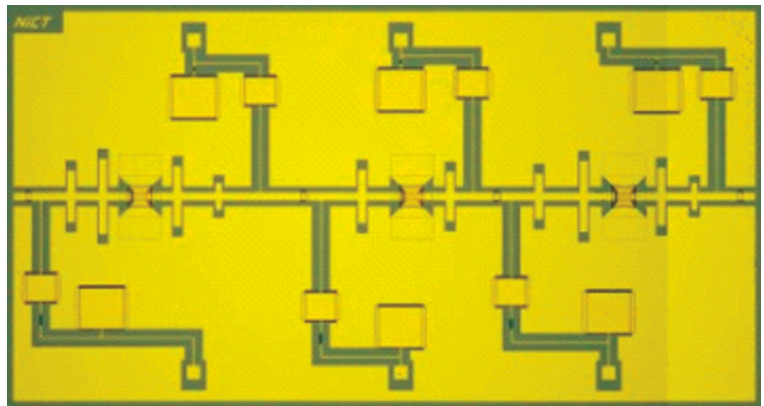


図10 InP系HEMTを用いた3段構成コプレーナ線路(CPW)型LNA-MMIC