



渡邊 斉\*

# 光・高周波デバイスの現状と展望

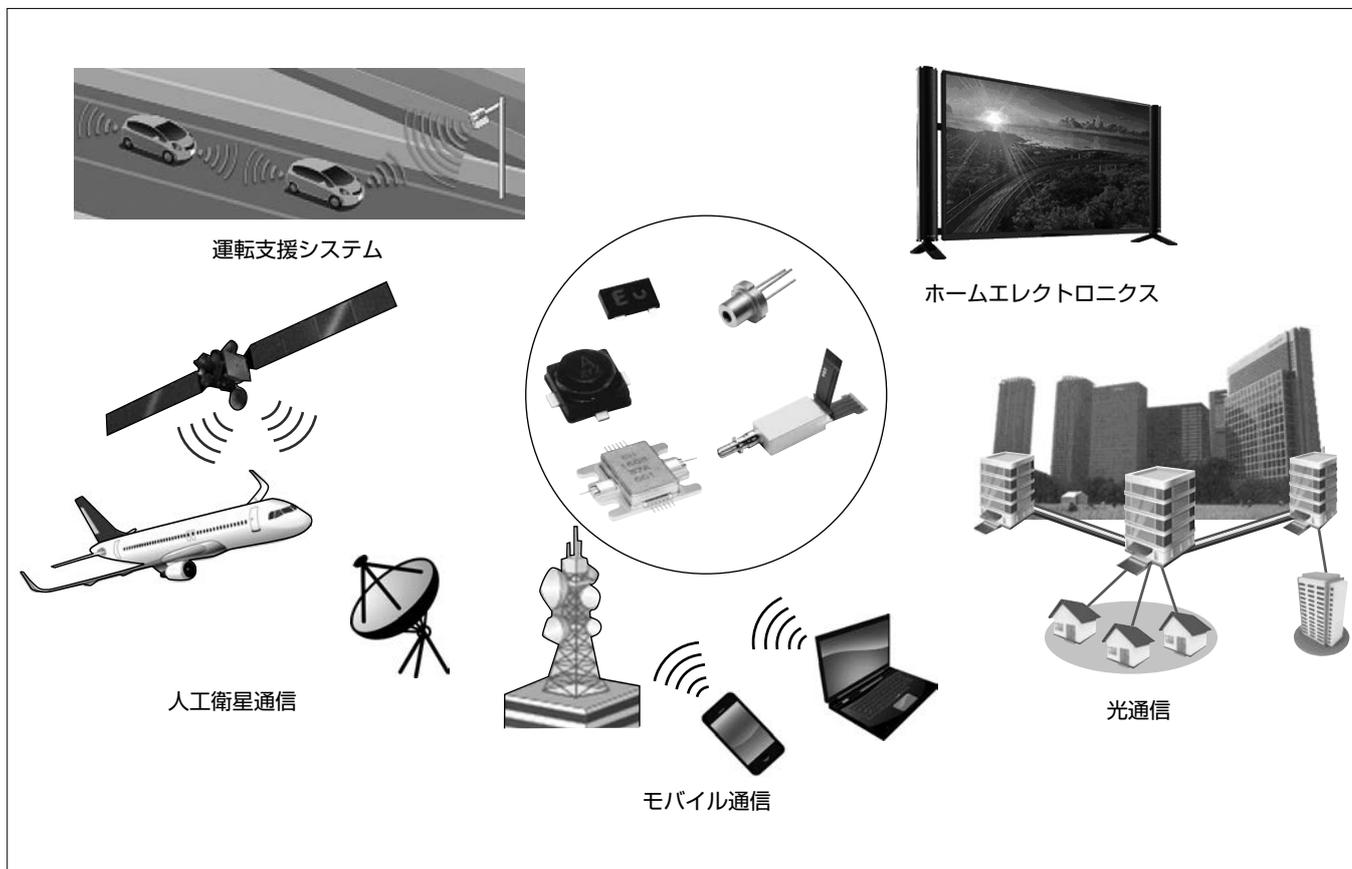
Status and Outlook of Optical and High Frequency Devices

Hitoshi Watanabe

## 要旨

スマートフォンに代表される情報機器の全世界的な普及に伴い、データ通信だけではなく、画像や音声をいつでもどこでも利用できる社会になり、取り扱うデータ量も飛躍的に増加している。これらの通信インフラを支えているデバイスが化合物半導体を用いた光デバイスや高周波デバイスである。モバイル通信には、室内のようなモビリティの低いケースから航空機で移動するモビリティの高い事例まで様々な用途がある。現在、次世代携帯電話の通信規格となる第五世代通信(5G)が議論されているが、そこでは通信帯域を確保するために3.5GHz～ミリ波帯の高い周波数帯が候補となっており、GaN(窒化ガリウム)半導体やGaAs(ガリウムヒ素)半導体を用いた高周波デバイスが不可欠となる。

一方、光通信システムでも高速・大容量化に向けた取り組みが行われている。例えば、通信ネットワークの末端であるアクセスネットワークでは40Gbps級の次世代PON(Passive Optical Network)システムの開発が進んでいる。また、伸長著しいデータセンターでは400Gbpsに向けた規格の策定が始められている。いずれも高速で動作する光デバイスへの要求が強い。一方、新たな市場として、プロジェクタ光源、センサ、照明、加工機、エネルギー分野などへのGaAs半導体レーザの適用も始まっている。このように、情報通信だけではなく、社会のあらゆる場所で化合物半導体を用いた高周波デバイスや光デバイスの活躍の場が広がっており、社会が求めるキーデバイスとしてますますその重要性を増している。



## 三菱電機の光・高周波デバイスが支える社会

当社の光・高周波デバイスは、高速大容量通信システムに限らず各種通信装置、車載用通信及びセンシング装置やホームエレクトロニクス製品など広い分野に適用され、社会を支えている。

## 1. ま え が き

スマートフォンに代表される情報機器の全世界的な普及に加え、インターネット経由の動画配信需要の増加によって、取り扱うデータ通信量が飛躍的に増加している。今後、あらゆるものがインターネットに接続されるIoT (Internet of Things)社会が到来すると考えられ、高速情報機器や大容量通信システムの基幹部品である高周波デバイスや光デバイスには一層の技術的發展と供給数量の拡大が望まれている。また、これらのデバイスは、その特長からプロジェクト光源、センサ、照明、加工機、エネルギー分野などにも用途を拡大し、様々な産業分野に浸透しつつある。

本稿では、シリコン(Si)半導体とは一線を画し、独自の發展を遂げているGaAs、GaNやInP(インジウムリン)などの化合物半導体を用いた高周波デバイス及び光デバイスの技術動向について述べる。また、これらの将来展望についても述べる。

## 2. 高周波デバイス

### 2.1 市場・技術動向

#### 2.1.1 モバイル通信

無線には、ケーブルでつなぐことなく、画像、音声、データ等の情報を送ることができる特長がある。このため、空間的に離れている場所間で、情報のやり取りをしたい場合に有用であり、モルス信号に始まり、ラジオ放送、テレビ放送、衛星放送によって広く情報を伝達することや、トランシーバ、業務無線、携帯電話といった双方向に音声をやり取りする機器、反射波の情報を用いるレーダ等に使われてきた。近年は機器のデジタル化に伴い、画像や音声だけではなく、データ通信に無線が多用されており、人々はわずらわしい配線に縛られることなく、自由に移動しながらネットワークにつながる事が可能となり、いつでもどこでも情報化社会の恩恵を受けることができるようになった。これらの無線インフラを支えているデバイスが高周波デバイスであり、無線通信技術の進歩と共に歩んできた。

モバイル通信には、室内のようなモビリティの低いケースから、屋外で歩く、車で移動する、船舶や航空機で移動するといったモビリティの高い事例まで、様々な状況がある。室内では移動する距離や速度が限定的であるため、無線LAN(Local Area Network)が普及しており、今や社会インフラの1つとなりつつある。

次にモビリティの高い屋外での徒歩や車での移動をサポートしているのは携帯電話の通信網であり、現在は第四世代(4G)のLTE(Long Term Evolution)、LTE-A(Advanced)が主流となっている。通信速度は、1 Gbpsに迫りつつあり、メール、データ、画像やブラウジング、動画を扱うのは日常のものとなった。

一方、更に移動度が高い航空機や船舶では、携帯電話の

サービス範囲を超えて移動することから、衛星を用いた衛星通信によるデータ通信が提供されており、地球の隅々までネットワークにつながるサービスが提案されている(図1)。

#### 2.1.2 第五世代通信

現在、2.1.1項で述べたネットワーク化を更に推し進めるものとして、携帯電話の次世代となる第五世代通信(5G)が議論されている<sup>(1)</sup>。5Gの方向性は次のとおりであり、今までにない価値の提供を目標としている(図2)。

##### (1) 新たな体験

現代から1桁の速度向上(10Gbps)、1,000倍の通信量容量を提供することによって、従来はデータの制限のために実現できなかった8K(スーパーハイビジョン)動画や仮想現実(Virtual Reality: VR)、拡張現実(Augmented Reality: AR)、触覚通信といった新たな体験を可能とするものである。実現するためには現在の携帯電話周波数だけでは帯域が足りないため、ミリ波帯等の高い周波数帯で帯域を確保した通信が必要となってくる。また、複数の機器がアンテナのセル内にあるとデータを分割するために通信速度が落ちる問題があるが、多素子アンテナ(Massive MIMO(Multi Input Multi Output)アンテナ)技術の導入によって1台のアンテナで多くのユーザーを収容できるようにすることで解決できる。

##### (2) 全てのものにつながる

IoTでは、スマートグリッド、工場の自動化、ホームセキュリティ等が考えられており、センサやメータ、家電機器等のあらゆるものに通信機能を付与することから、通信速度は遅いにつながる機器は数百億台以上と予想されてお

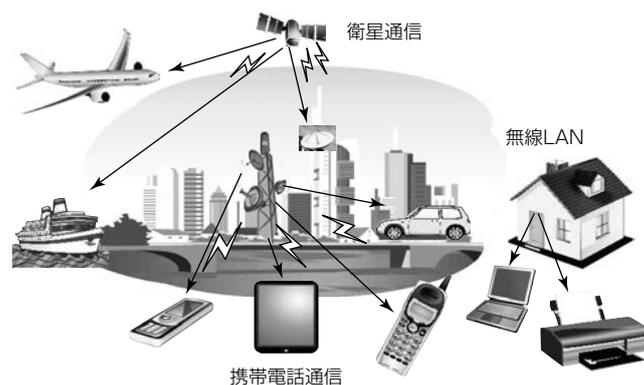


図1. モバイル通信

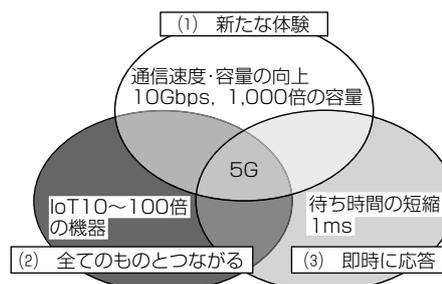


図2. 第五世代通信(5G)の方向性

り、安価であると共に通信機能を集積化した小さな素子が必要である。また、バッテリーの制限がある場合も多いことから超低消費電力なデバイスが求められている。

(3) 即時に応答

待ち時間の短縮(1ms)によるリアルタイムな応答によって、例えば、自動運転している車に情報を伝えて事故防止したり、遠隔医療で手術をするといった場合が想定されている。車の場合、路車間・車車間通信、車とクラウド間の通信といった複数の通信ネットワークをリアルタイムに結ぶことが必要となる。無線とネットワークとのインターフェースの改善によってネットワーク全体の応答を改善する研究が進められている。

5Gに向かって通信量が大幅に増加すると、通信に必要なエネルギーが増大する。地球温暖化に伴うグリーン化の要請から、通信の消費電力の低減が大きな課題となっている。電力を多用する携帯電話基地局の電力を削減するためには、多素子アンテナによる効率的な電波配分や、消費電力の大きい高周波増幅器や高速デジタル機器、電源等の省エネルギー化が求められている。

2.1.3 エネルギー分野への応用

高周波デバイスの新たな応用分野としてエネルギー分野がある。数十MHz帯の共鳴現象を用いてパソコンやタブレットに給電するワイヤレス給電や5GHz帯を用いて宇宙空間から地上に送電する宇宙太陽光発電が研究されており、無線の新たな用途として注目されている。また、マイクロ波による化学反応の促進や加熱を行ったり、プラズマを生成して自動車エンジンの燃焼効率を改善するといった新しい応用分野についても研究が進んでいる(図3)。

2.2 高周波応用での化合物半導体デバイスの展望

2.2.1 半導体デバイスと応用分野

無線機器では、Si半導体や化合物半導体が使われており、周波数や出力電力によって最適なデバイスが使われている。図4に周波数・出力電力と半導体デバイスの関係を示す。図中の楕円(だえん)は応用分野を表しており、分野ごとに周波数や出力電力が異なるために半導体を使い分けている。出力電力が小さな用途にはSiデバイスであるCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)やSiGe(シリコンゲルマニウム)デバイスが多用されるが、1W以上の出力では化合物半導体を用いたGaAsデバイス、数十~数百Wの電力では、GaNデバイスが使われる(3~50GHz)。これは、Si半導体に比べて化合物半導体のバンドギャップエネルギーが大きく、より高い電圧で動作させることができるためであり、高電力が必要な分野には化合物半導体が不可欠である。このため、衛星通信用高出力増幅器や、4G携帯電話基地局、レーダ、エネルギー分野にはGaNデバイスが使われ、4G携帯電話端末にはGaAsデバイスが使われる。

半導体の特性として移動度も重要な指標となる。高い周

波数で動作させるには移動度の高い半導体を採用する必要があり、90GHz以上のミリ波帯ではInP半導体が使われる。高周波や高出力が必要な分野は化合物半導体の独壇場であり、Si半導体では実現できない価値を提供している。

一方、周波数が低い業務用無線等の領域では、耐圧が比較的高く、高周波特性も良好なLDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor)構造のSi半導体が使われ、特に高電圧が要求される用途にはSiC(シリコンカーバイド)半導体が使われる。近年注目されているワイヤレス給電では、数十MHzのスウィッチング周波数となるため、高電力ではGaN半導体やSiC半導体、低電力ではSi MOS(Metal Oxide Semiconductor)が使われつつある。GaNデバイスはスウィッチングが高速で効率が高くなるが、土台となるSiC基板のコストが高い問題がある。これに対して安価なSi基板上にGaN半導体をエビ形成するGaN on Siデバイ스가開発され、実用化が進みつつある。

2.2.2 5G用デバイス

5G携帯電話基地局は通信容量を増やすために多素子アンテナとなり、デバイスの出力電力は従来より小さくなる。

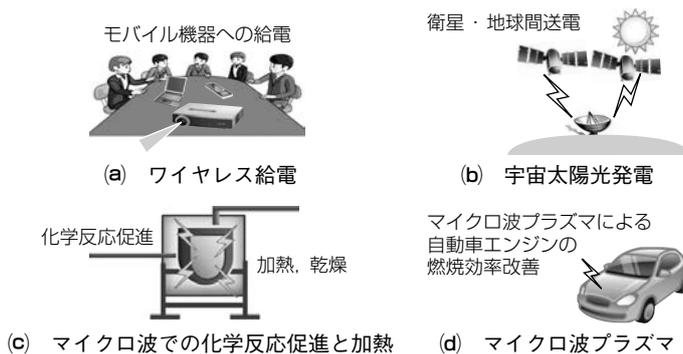


図3. マイクロ波のエネルギー応用

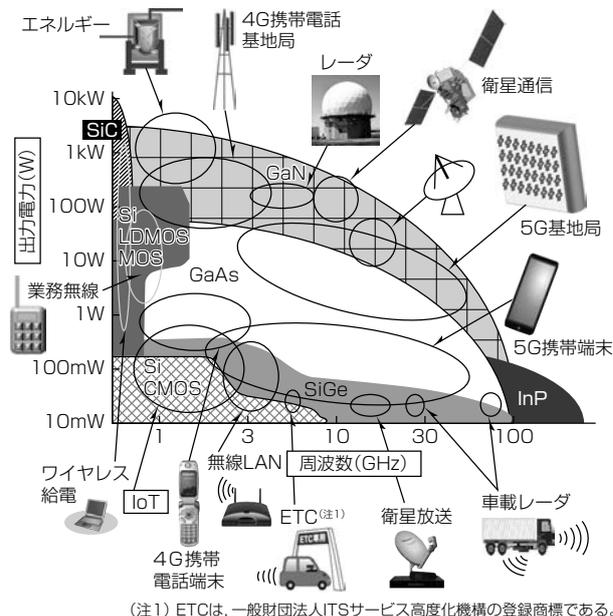


図4. 半導体デバイスの周波数・出力電力と応用分野の関係

(注1) ETCは、一般財団法人ITSサービス高度化機構の登録商標である。

周波数としては、通信帯域を確保するために3.5GHz～ミリ波帯の高い周波数帯が候補となっており、GaNデバイスやGaAsデバイスが最適となる。一方、多素子アンテナでは、波長以下の間隔でアンテナを並べるため、例えば30GHz帯ではわずか4mm程度の間隔しかなく、アンテナに一体化するRF(Radio Frequency)フロントエンド部は集積化によって小型化することが必須となる。さらに、放熱面積の関係から発熱量が少ない高効率なデバイスが求められており、集積化された化合物半導体が5Gのキーデバイスとなる。端末についても周波数が高くなって出力が低下する傾向にあることから、GaAsデバイスとSiGeデバイスが検討されている。

2.2.3 IoT用デバイス

IoTについては低い周波数で安価に製造できることと、通信機能等の集積化が必須となることから、SiデバイスのCMOSやSiGeデバイスが有力である。センサのようにバッテリーが問題となるIoT機器では省電力デバイスが盛んに開発され、電波からエネルギーを得るエナジーハーベストデバイスも研究が進みつつある。

3. 光デバイス

3.1 市場・技術動向

半導体レーザーと光ファイバを用いた光通信システムは、大容量で長距離通信が可能であることから、大都市間や大陸間の数百～数千kmにも及ぶコアネットワークから、都市間をリング状につなげる距離数十～数百kmのメトロネットワーク、また、一般家庭などのエンドユーザーを接続する伝送距離がおおむね20km以内のFTTH(Fiber To The Home)に代表されるアクセスネットワークにまで幅広く適用されている(図5)。1990年代に始まったインターネットの爆発的な普及、2009年以降のスマートフォンやタブレット端末などの無線機器の全世界的な普及に続き、近年はクラウドコンピューティングの広まりによって通信容量は増加の一途を辿(たど)っている。

3.1.1 アクセスネットワーク

国際電気通信連合(ITU)の報告によると、2016年末までに世界の人口の約半分に当たる35億人がインターネットを利用するようになる。このような全世界的な通信容量の増加に応えるため、光通信システムでは高速・大容量化に向けた様々な取組みが行われている。例えば、通信

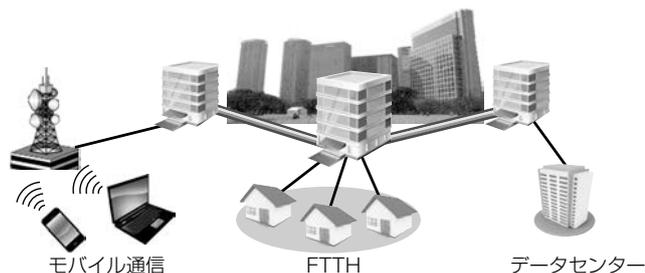


図5. 光通信ネットワーク

ネットワークの末端であるアクセスネットワークでは、主にPONと呼ばれる経済的な光アクセスシステムが利用されている。これまで下り最高速度が1GbpsのGE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)及び下り最高速度2.5GbpsのG-PON(Gigabit-Passive Optical Network)が普及してきたが、現在は最高速度10Gbpsを実現する10G-EPON及びXG(10Gbit capable)-PONの導入が始まっている。また、次世代光アクセスシステム(NG-PON2: Next Generation-PON2)という40Gbps級のPONシステムの導入の検討が始められている。一方、伸長著しい無線アクセスネットワークでも、無線基地局とアンテナ局間を結ぶモバイルフロントホール(Mobile FrontHaul: MFH)や、無線基地局とコアネットワークを結ぶモバイルバックホール(Mobile BackHaul: MBH)の大容量化が必要となっており、6Gbps又は10Gbpsから25Gbpsへの高速化が始まっている。

3.1.2 データセンター向けネットワーク

近年積極的に設備投資が行われているデータセンター向けでは、短距離(数百m)のサーバ間通信が主流であったため、低消費電力で高速動作が可能な面発光レーザーとマルチモードファイバ(MMF)を用いたシステムが普及してきたが、データセンターの大規模化によって、数kmの距離を100Gbpsもの大容量で伝送できるシステムが求められており、面発光レーザーに比べ長距離伝送が可能なDFBレーザー(Distributed FeedBack Laser)や変調器集積レーザー(Electro absorption Modulated Laser: EML)とシングルモードファイバ(SMF)を用いる通信方式が導入され始めている。現在では200Gbps又は400Gbpsに向けた仕様の検討が始められている。

一方、これらの通信システムの低コスト化に向けて光デバイスの高機能化や集積化による部品点数の削減と小型化が精力的に進められており、例えば、100Gbpsの通信容量を実現するために25Gbpsの信号を乗せた4波長の半導体レーザーと光合波器を単一パッケージに集約した100Gbps集積TOSA(Transmitter Optical Sub Assembly)を用いた小型トランシーバが普及している。さらに、将来に向けた低コスト化には、Siをベースとした光集積回路(PIC: Photonic Integrated Circuit)が目覚ましい進展を見せており、いわゆるシリコンフォトンクスと総称される光パッシブ回路、光変調器、受光素子の集積化だけでなく、同一のSiプラットフォーム上へのレーザー実装の期待も大きい(図6)。

3.1.3 コアネットワーク

アクセスネットワーク及びデータセンター向けネットワークの上位に位置するコアネットワークでは、デジタル信号処理を用いたデジタルコヒーレント技術が導入され、1波長当たり100Gbpsの容量を持つ光伝送システムが運用されている。デジタルコヒーレント伝送用トランシーバ

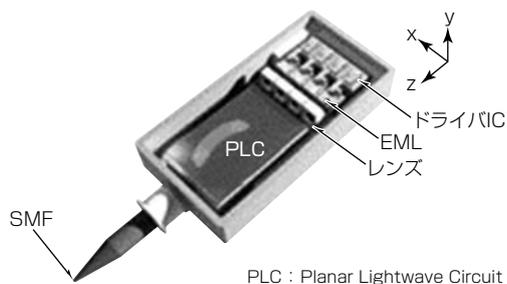


図6. 合波器としてPLCを使った100Gbps集積TOSA

は狭線幅波長可変レーザと、ニオブ酸リチウム(LiNbO<sub>3</sub>)を材料とした光変調器とドライバーICから構成されており、近年光変調器をレーザと同じInP半導体によって作製することで、波長可変レーザと一体化し、大幅な小型化を図った化合物半導体集積デバイスの普及が始まろうとしている。

3.1.4 新たな応用分野

化合物半導体光デバイスを用いた新たな分野として、照明・センサ・加工機への応用がある。半導体レーザの持つ純色性や高効率といった特長が、従来の蛍光管やLED(Light Emitting Diode)を用いた方法では及ばない高画質を実現することが可能であり、液晶テレビのバックライトやプロジェクタへの適用が行われている。青色レーザと蛍光体を用いた白色光源も既に身近な商品として各家庭にまで普及している。今後プロジェクタでは、環境配慮、即時点灯、長寿命化に加え、青色レーザと蛍光体に赤色レーザを用いることで、高輝度、広色域化が実現できるため、水銀ランプから半導体レーザへの置き換えが急速に進むと考えられる。また、LEDに比べ直進性に優れたレーザ光の特長を活用し、自動車ヘッドライトへの応用も始まっている。近年普及が著しい自動車の衝突防止用センサとしても、ミリ波レーダ、可視光カメラと並び、主に低速域の衝突回避支援ブレーキ用途に赤外線レーザが用いられている(図7)。

3.2 光応用での化合物半導体デバイスの展望

3.2.1 光デバイスの高速化

半導体の中でも、InP半導体やGaAs半導体などの直接遷移型化合物半導体は、組み合わせる材料を変化させることで様々な波長の光を生み出すことができる。これはSi半導体では決して実現できない機能である。光通信の分野では、半導体レーザなど光デバイスとシングルモードファイバとの組合せによって長距離・大容量通信を可能にしており、そのシステム能力は光デバイスの性能に依存する側面が強い。したがって、現在も半導体レーザの動作限界に挑戦する取組みが各研究機関で進められている。100Gbpsや400Gbps光通信システムを実現するためには、25Gbpsを並列又は波長多重で動作させる高速光デバイスが求められる。これに呼応して半導体レーザの内部構造を更に微細かつ巧妙に加工する技術が進展し、現在では25Gbpsの直接変調DFBレーザが製品化され始めている。



図7. 光デバイスの新たな応用分野

3.2.2 光デバイスの集積化

機器の小型化のため、複数の半導体レーザやその他の機能を1チップに集積化する取組みも行われている。最近ではInP材料を用いた位相変調器の開発も進み、DFBレーザと位相変調器及び半導体増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)を集積化したり、複数個のレーザと光導波路、MMI(Multi-Mode-Interferometer: 多モード光干渉)カプラを集積化したデバイスの研究も活発化している。また、このような集積デバイスを支える結晶成長技術、高精度エッチング技術、高段差プロセスなど、化合物半導体特有の製造プロセス技術の進展も目覚ましい。一方、Siプラットフォームと半導体レーザのハイブリッド集積化技術も並行して進んでいる。いずれにせよ、100Gbpsや400Gbpsの通信容量を1チップで実現する光デバイスが近い将来に登場することになるだろう。

3.2.3 光デバイスの高出力化

GaAsを用いた半導体レーザは、照明、プロジェクタ光源、センサ、加工機などに用いられることから高出力化への要求が強い。半導体レーザの格段の高出力化には、レーザ光の射出端面での破壊的光学損傷を抑制することが必要であり、レーザ光の射出端面保護技術の開発と放熱性に優れたパッケージの開発が進んでいる。今後も半導体レーザが持つ高いエネルギー密度や高効率性から急速にその普及が進み、特にプロジェクタや加工機分野に画期的な変化をもたらすであろう。

3.2.4 IoTへの対応

IoT時代ではネットワークに接続するセンサ数が数百億個を超えると言われており、あらゆる機器がネットワークにつながることで、新たな価値を生み出す世界が目前に迫っている。化合物半導体を用いた光デバイスは、IoT時代ネットワークの底辺を支えるキーデバイスとして、ますますその役割は重要になっており、当社も積極的に開発を進めていく。

4. むすび

情報通信の更なる高速化、システムの普及に貢献する装置の小型化と低消費電力化を実現するための基幹部品である光・高周波デバイスの現状と展望を述べた。情報通信分野だけではなく、当社は社会が求めるキーデバイスをグローバルに提供し、ゆとりある社会の実現に向けて貢献していく。

参考文献

- (1) 総務省：通信情報白書 平成28年版