

三菱電機技報

| 2-3

| 2023

| Vol.97 No.2-3

No.2 : デジタルトランスフォーメーション

No.3 : 高周波・光デバイス

【お知らせ】

2023年2-3月号をもって三菱電機技報の冊子発行を終了します。

引き続き三菱電機オフィシャルWEBサイトで三菱電機技報をご覧ください。

URL : <https://www.MitsubishiElectric.co.jp/corporate/giho/index.html>

なお、2023年4月号から三菱電機技報の発行をお知らせするメールマガジンを開始予定です。

ご登録をお願いします。

URL : <https://www.MitsubishiElectric.co.jp/corporate/giho/ssl/php/members/registuser/kiyaku.php>



三菱電機技報
メールマガジン
会員登録ページ

三菱電機では、サステナビリティ経営を実現する4つのビジネスエリアとして、「インフラ」「インダストリー・モビリティ」「ライフ」「ビジネスプラットフォーム」を設定しています。

三菱電機技報ではこの4つのビジネスエリアに分類し特集を紹介しています。

今回の特集では全エリアを支える基盤となる“デジタルトランスフォーメーション”(2月号)、ビジネスプラットフォーム領域の“高周波・光デバイス”(3月号)をご紹介します。

No.2

特集

デジタルトランスフォーメーション

Digital Transformation

巻頭言

- 三菱電機のDX：循環型デジタル・エンジニアリング企業へ
進化するための起爆剤 4
榊原 洋

- Digital Transformation at Mitsubishi Electric
— A Powerful Catalyst for the "Circular Digital—Engineering Company" —
Hiroshi Sakakibara

- 建設業の業務効率化に貢献するAI配筋検査システム 5
宮本高明・宮本 健・井原宏幸・青木 透・久柴拓也

- AI Rebar Inspection System Contributes to Business Efficiency in Construction Industry
Takaaki Miyamoto, Ken Miyamoto, Hiroyuki Ihara, Toru Aoki, Takuya Hisashiba

- 事業DXを支えるローカル5G技術 9
友江直仁・三宅裕士・山本寛人・大賀正夫・青山哲也・松永 亮

- Local 5G Technology Supporting Digital Transformation for Business
Naohito Tomoe, Yuji Miyake, Hiroto Yamamoto, Masao Oga, Tetsuya Aoyama, Ryo Matsunaga

- M-X推進上の業務改革の柱とその解決策・投資効果 13
小川真克・高柳岳宗

- Goals of Business Process Reengineering through M-X, Solutions to Achieve and Return On Investment
Masayoshi Ogawa, Takenori Takayanagi

- 三菱電機の業務DXを支える広域ネットワーク 17
佐藤 仁・岡村宗一郎・近藤拓朗

- Wide-area Networks Supporting Digital Transformation for Operation in Mitsubishi Electric Group
Hiroshi Sato, Soichiro Okamura, Takuro Kondo

- DXを支えるプロセスと開発環境 21
吉岡克浩・細谷泰夫・古川裕史・古賀陽一郎

- Process and Development Environment Supporting DX
Katsuhiro Yoshioka, Yasuo Hosotani, Hirofumi Furukawa, Yoichiro Koga

- 家電製品などの補修用性能部品の需要予測AI開発・適用 25
前田千徳・小部敬純・永松大居・寺本一季・金子貴幸

- Mitsubishi Electric's New AI Forecasts Demand for Appliance Repair Parts
Kazunari Maeda, Takasumi Kobe, Daigo Nagamatsu, Kazusue Teramoto, Takayuki Kaneko

No.3

特集

高周波・光デバイス

High Frequency and Optical Devices

巻頭言

- 高周波・光デバイスへの期待と人材育成 29
西山伸彦

- Expectations toward High-frequency/Photonic Devices and Importance of Human Resource Development for their Technologies
Nobuhiko Nishiyama

巻頭論文

- 高周波・光デバイスの最新動向と将来展望 30
増田健之

- The Latest Status and Future Outlook of High Frequency and Optical Devices
Kenji Masuda

- 5G基地局用広帯域10W級GaN増幅器モジュール 35
坂田修一・田口巴里絵・寺西絵里・嘉藤勝也・小松崎優治

- 10W Class, Wideband GaN Power Amplifier Module for 5G Base-Stations
Shuichi Sakata, Marie Taguchi, Eri Teranishi, Katsuya Kato, Yuji Komatsuzaki

- データセンター向け
広動作温度範囲CWDM 100Gbps EML 39
東 祐介・丹羽顕嗣・尾上和之・恵良淳史・森田佳道

- Wider-temperature-range CWDM 100Gbps EML Chip for Data Centers
Yusuke Azuma, Akitsugu Niwa, Kazuyuki Onoe, Atsushi Era, Yoshimichi Morita

- 第5世代移動通信システム基地局用
50Gbps DFBレーザ 43
境野 剛・島田征明・白尾瑞基

- 50Gbps DFB Laser Diode for 5G Base Stations
Go Sakaino, Masaaki Shimada, Mizuki Shirao

- 400Gデジタルコヒーレント通信用
1.55μm帯チューナブルDFBレーザ 47
永尾龍介・松本啓資・上野貴寛・奥畑 亮・岡 俊英

- 1.55μm Tunable DFB-LD for 400G Digital Coherent Optical Transmission System
Ryosuke Nagao, Keisuke Matsumoto, Takahiro Ueno, Ryo Okuhata, Toshihide Oka

- サーマルダイオード赤外線センサ“MeIDIR”と
ユーザーサポートツール 51
相原育貴・奥田聡志・服部公春・立岡靖晃・高橋貴紀

- Thermal Diode Infrared Sensor "MeIDIR" and User Support Tools
Yasuki Aihara, Satoshi Okuda, Masaharu Hattori, Yasuaki Tatsuoka, Takanori Takahashi

巻頭言

高周波・光デバイスへの期待と人材育成

Expectations toward High-frequency/Photonic Devices and Importance of Human Resource Development for their Technologies



西山伸彦 *Nobuhiko Nishiyama*

東京工業大学 工学院 電気電子系 教授

Professor, Tokyo Institute of Technology, School of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering

“世の中はエーテルと呼ばれる基本元素で満たされている。”古代ギリシャ時代から近年まで、天体の運動、そして光・電磁波がなぜ真空中でも伝播(でんぱ)できるかを説明するために、使われてきた考え方である。電場と磁場の関係がエーテルの存在がなくても説明できると初めて示したのは、アインシュタインの相対性理論の論文であり、つまり20世紀に入ってからだ。その後、一世紀もたたない間に、“やはり世の中はエーテルで満たされている。”と言える状況になっている。エーテルとは、英語で書くと“ETHER”ですと言えば分かってもらえるであろうか。ネットワークで使われるEthernetの語源である。もはや人々が意識することなく、ネットワークを多用する時代になったが、こんなよもやま話でも光・電磁波は、ネットワークと切り離せない媒体であったということが分かる。

今後の10年、20年を予想したときに、そのエーテルの密度はますます濃くなる。ネットワークの社会的必要性・要求は拡大する一方であることに疑いの余地はなく、特に、Connected X(Xには、Health, Carなど様々なものが入る)と言われるあらゆる端末から送信される情報を基にした個人ベースにカスタマイズされたオンデマンドな情報で、情報吸い上げも伝達も有線・無線ネットワークが介在し、様々な粒度の情報が行き来することから、ネットワークには大容量・低遅延、そして柔軟性が必要になる。また、その情報処理も光電融合技術をベースにした分散コンピューティング技術が必要であろう。自動運転で期待されているレーダーやLiDAR(Light Detection and Ranging)技術は、セキュリティの観点から人流計測などにもそのアプリケーションを広げようとしていると聞く。これらだけを見ても、高周波・光デバイス技術は、世の中の必須アイテムとしてその活躍を広げていくことは確実である。結果として、今後も

デバイスの高帯域化、低エネルギー化、そして多機能化などが、容赦なく研究開発者に要求されることになる。ただし、そもそも高周波・光デバイスは、電磁波理論、デバイス理論、結晶理論、シミュレーションスキルなど必要な知識が多すぎて、そんなことを集めていくと、とにかく学ぶこと・考えることは膨大になってしまう。じゃあ、一人でできないから分業すればいいのか？私は少し違うと考える。分業し、自分の専門だけに組み組めば、その分野のプロとして、デバイスの小さな改善を積み重ねることは可能かもしれない。一方で、例えば今後必須になる大規模光集積回路などへの対応はできなくなる。よく私は学生に“T字型人間になりなさい”という話をする。一つの技術はともかく深く知る(エキスパートになる)と同時に、周りの技術も何となく知っていて“これは彼に聞けばいい”“これはこの教科書を見ればいい”ということが分かるような人間になれるということである。そうすれば、横に広げた傘が、結果として絡み合い、チームとして見たときに大きな力を発揮する。分業を極めた“I字型人間”では絡むことはできないし、Tの真ん中の縦棒が短くてもやっぱり駄目である。

繰り返しになるが、今後、高周波・光デバイスにはこれまでも増して多くの要求がなされる。それを解決するためのT字型人間の集団を高周波・光デバイスに携わる機関は作らなければならない、そのためには、研究開発者全員が“外(学会等)へ出ていき情報を仕入れる”“自ら学ぶ機会を逃さないし、機会を作る”“仲間といろんな話をする”という狩猟的行動への変換が必要だ。もちろん個人の意識改革だけでなく、それを良しとする機関の環境の両方が必須だ。この三菱電機技報も多くの技術者が目にして、特集論文の中から一つでも学ぶきっかけを得ることができれば、そんな人材育成のスタートになるのではないかと期待している。

高周波・光デバイスの最新動向と将来展望

The Latest Status and Future Outlook of High Frequency and Optical Devices



増田健之*
Kenji Masuda

要 旨

デジタルトランスフォーメーション(DX)の進展によって、DXを支える情報通信インフラの重要性がますます高まっている。インフラに不可欠な高周波・光デバイスでは、高速化に加えて、低消費電力化が大きな開発課題になっている。

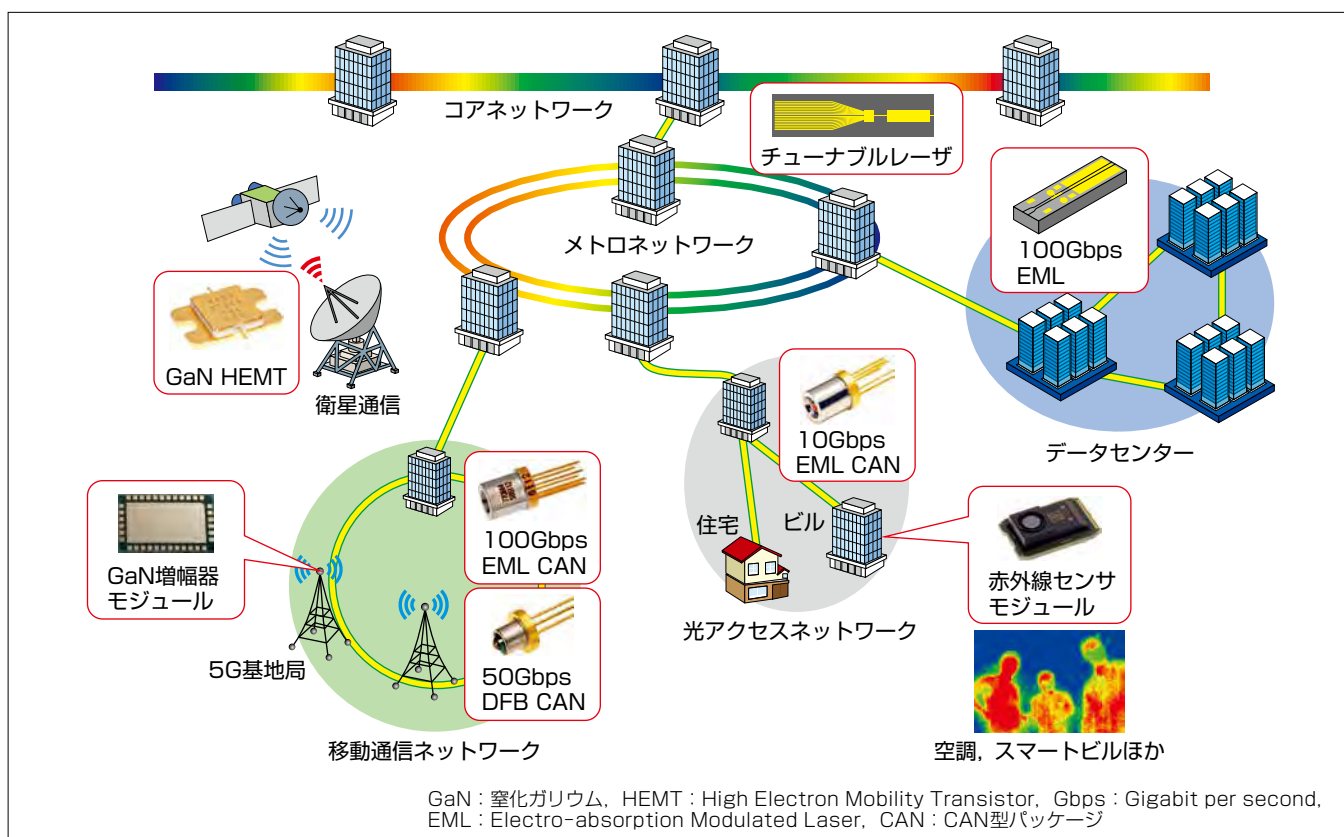
第5世代移動通信システム(5G)は、超高速、超低遅延、超高信頼及び多数同時接続性を特長とし、基地局にアンテナ素子が複数個配置されたアレーアンテナを用いて、各ユーザー端末に向けて広帯域な変調信号を同時かつ効率的に伝送可能である。5G基地局用電力増幅器には、高効率動作と高い線形動作の両立に加えて、広帯域動作への要求が増加している。

三菱電機は、この用途向けに小型高効率で発熱が少なく広帯域なGaN増幅器を開発・製品化している。

一方、通信インフラの基幹部を担う光通信ネットワークは、データセンター内も含めて、ネットワークの全階層で高速化と伝送容量の増強が進められている。

当社は、単位時間当たりの伝送信号量を倍增できる多値変調が可能な光デバイスを開発しており、分布帰還型レーザ(Distributed FeedBack Laser Diode : DFB-LD)では50Gbps、電界吸収型変調器集積レーザ(EML)では100Gbpsまでの製品を低消費電力で実現している。

さらに、当社は、高性能な小型・低価格赤外線センサモジュール“MelDIR”の高画素化や検出温度範囲の拡大を進めており、防犯、室内見守り、人数カウント、スマートビルといった用途に加えて車室内見守りなど幅広い分野への応用が期待される。



当社の情報通信用高周波・光デバイスの適用分野

当社の高周波・光デバイスは、移動通信、光通信、センシングなど幅広い分野に適用されている。

1. ま え が き

データとデジタル技術を活用して、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するDXが推進される中、2020年の新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的な拡大を受けて、新たな生活様式へのシフトや企業活動の革新がグローバルな規模で進んでいる。国内のインターネットトラフィックは、2019年11月に比べて約2倍に増加(2022年5月時点)⁽¹⁾するなど、DXを支える情報通信インフラの重要性がますます高まっている。

5Gなどの通信インフラやデータセンターの整備が急速に進められているが、将来、IoT(Internet of Things)や自動運転の普及で大量のデータ通信が必要になると予想されている。“デジタル田園都市国家インフラ整備計画”⁽²⁾では、5Gの特長である超高速、超低遅延、超高信頼及び多数同時接続性を更に向上させたBeyond 5G(6G)の研究開発の推進が示されている。

国内の情報通信インフラの消費電力は2050年には2018年比で500倍以上と予想される⁽³⁾。また、政府方針では、2040年に半導体・情報通信産業のカーボンニュートラルを目指すことが示されており⁽⁴⁾、消費電力の低減が大きな開発課題になっている。

本稿では、これら情報通信の進展やその省電力化を支える高周波・光デバイス、赤外線センサについて、その最新動向と将来展望を述べる。

2. 高周波デバイス

2.1 市場・技術動向

Si(シリコン)系デバイスに比べて高耐圧特性を持つGaAs(ガリウムヒ素)に代表される高周波用化合物半導体デバイスの主な用途は、所望の無線電力レベルに高周波信号を増幅する電力増幅器である。その代表例が携帯電話機及び基地局用電力増幅器(図1)と衛星通信やレーダ用電力増幅器である(図2)。2010年代になると、GaAsよりも高い電源電圧(20~50V)で動作可能なGaNデバイスの実用化が進んで、高出力かつ高効率動作が要求されるレーダや衛星通信地上局では、GaAsからGaN電力増幅器への置き換えが始まった。

携帯電話基地局用電力増幅器にGaNデバイスが適用され始めたのは比較的最近で、5Gの本格運用が契機と言える。5Gによって3~5GHzという従来よりも高い周波数の利用が可能になった。これまで主役であったSi系電力増幅器よりもGaN電力増幅器の方がより高効率で増幅動

作できるためである。一方、3.7V程度と低い標準バッテリー電圧の下で動作しなければならない携帯電話機用電力増幅器では、Si系デバイスよりも高効率動作可能なGaAs HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)が、今なお主役である(図1)。

ここでは、5G及び6Gで活躍が期待される携帯電話基地局用GaN電力増幅器への要求特性とデバイスの将来展望を述べる。

2.2 5G携帯電話基地局用電力増幅器向け要求性能

3G以降の基地局用電力増幅器では、低歪(ひず)みな信号を数km離れた端末に伝送するために、高効率動作と高い線形性動作との両立が求められてきた。5G基地局では、図1に示すように方形のアンテナ素子が複数個配置されたアレーアンテナを用いて、各ユーザー端末に向けて電波を効率的に照射する空間分割多重技術が使用されている。電力増幅器はアンテナ素子ごとに1個配置される。このアンテナの採用によって、従来よりも周波数利用効率を高めるだけでなく、広帯域な変調信号(図1)を複数のユーザー端末に伝送可能になり、最大で4Gの10~20倍の高速データ通信(10~20Gbps)が可能である。

また、世界各国の通信キャリアに対して共通の基地局で対応し、低コスト化を図るために、電力増幅器には、400MHz又はそれ以上の広帯域動作への要求も増加している。衛星通信地上局でも複数の搬送波の同時利用を可能にする広帯域化の要求が高まっている(図2)。

電力増幅器の入力電力と出力電力の関係は通例、最大効率が得られる最大出力電力付近で非線形性が顕著に表れる。

電力増幅器の非線形によって生じる歪みの影響は、次の二つがある。一つは自身のチャンネルの信号の歪みと、もう一つは隣接チャンネルへの電力漏洩(ろうえい)として表れる歪みである。前者は自身のチャンネル信号を受信した際のデータの誤り率を増加させ、後者は隣接する他のユーザーのデータの誤り率を増加させるため、共に所定の範囲内に抑制する必要がある。デジタル信号処理を用いた歪み補償

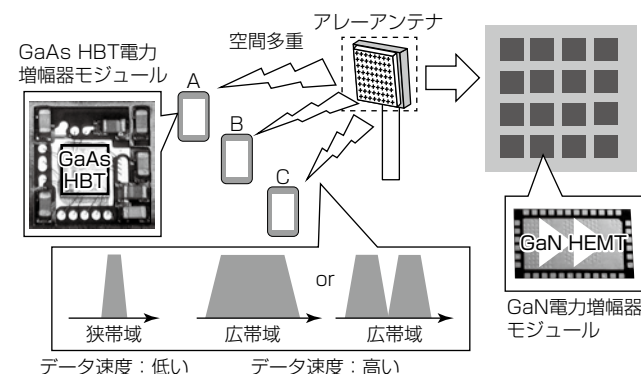


図1. 5G携帯電話機と基地局の電力増幅器

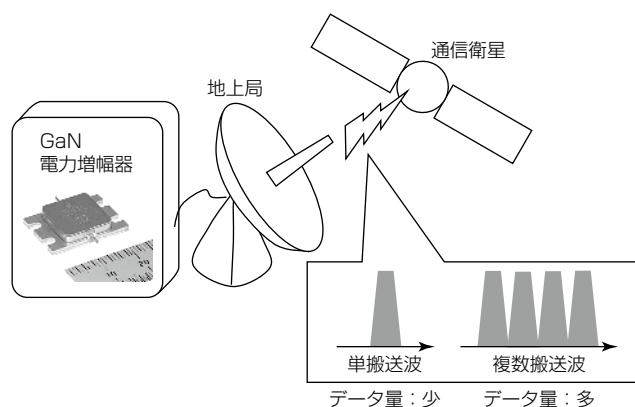


図2. 衛星通信用地上局の電力増幅器

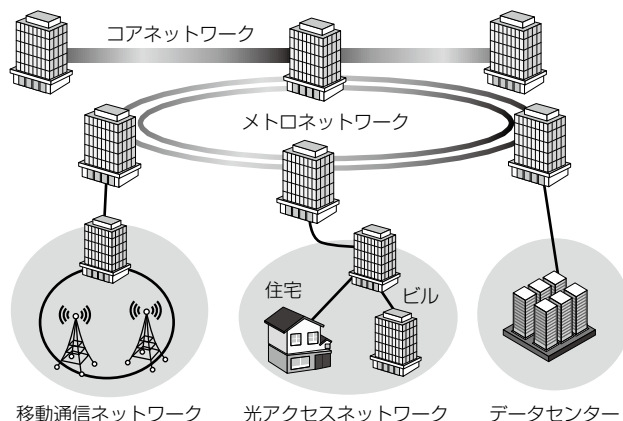


図3. 光通信ネットワーク

装置はこれらの歪みの抑制に非常に有効であるが、高性能な歪み補償機能とそれにかかるコストの間のトレードオフの観点から、GaN増幅器自体の線形性の確保も設計上重要な要素になっている。なお、図2に示す衛星通信用電力増幅器でも、これと同様の理由で線形性の確保は重要な設計事項になっている。

2.3 将来展望

GaNデバイスは実用化が進みつつあるとはいえ、GaAsデバイスに比べてまだ結晶欠陥の多さ等の観点からデバイス技術の成熟には至っていない。そのため今後も結晶成長などの基盤技術の改良が重要である。また、電力増幅器用GaNデバイスの現在の技術課題としては、出力電力の高密度化、高効率動作化、高周波動作化が挙げられる。出力電力の更なる高密度化はデバイスの温度上昇を伴うため、高放熱技術の一つであるGaN on Diamond等の新構造が検討されている。さらに超高周波の利用を目指す6Gでは、40~100GHzのミリ波帯に加えて、THz帯(0.1~10THz)の利用が検討されている。そのため、短ゲート長化などの研究も活発に進められている。GaNデバイスは、今後も性能向上が見込まれ、情報通信インフラのキーデバイスとしての貢献が期待される。

3. 光通信用デバイス

3.1 市場・技術動向

国内の総ダウンロードトラフィックは、固定系ブロードバンドサービスでは2022年5月時点で前年同月比8.8%増加し、移動通信では2021年12月時点で前年同月比16.4%増加している⁽¹⁾。今後もクラウドサービス、高精細動画やAR(Augmented Reality)／VR(Virtual Reality)を含むコンテンツ配信などによって、通信トラフィック総量の増大が見込まれる。通信インフラを担う光通信ネットワーク

(図3)では、光アクセスネットワーク、移動通信ネットワーク、データセンターなど全てで、伝送容量の増強が進められている。具体的には、大都市間や大陸間の数百~数千kmに及ぶコアネットワーク、都市間をリング状に接続する距離数十~数百kmのメトロネットワーク、移動通信基地局とアンテナ部を結ぶ移動通信フロントホールや、移動通信基地局とコアネットワークを結ぶ移動通信バックホールから、データセンター内通信やデータセンター間通信に至るまで、高速・大容量化が進められている。

コアネットワークでは、波長・変調速度当たりの伝送容量を更に拡大するために、光の振幅強度だけではなく、位相や偏波に情報を持たせるデジタルコヒーレント通信方式が採用されている。具体例としては、同一波長を二つに分けて90度の位相差を設けて、それぞれに位相反転を含む多値強度変調を加えて合成する直交振幅変調方式がある。移動通信ネットワークと同様に超高速インターネットの末端を支える光アクセスシステムFTTH(Fiber To The Home)でも、最高10Gbpsを実現するXG-PON(10 Gigabit capable-Passive Optical Network)やXGS-PON(10 Gigabit capable Symmetric PON)の普及が進んでいる。それに加えて、更なる高速化を目指した50Gbpsベースの光アクセスシステムとして、HS-PON(Higher-Speed PON)の標準化の議論も進んでおり、デバイスへ要求される仕様が合意され、実用化開発のフェーズに入っている。PONシステムでは敷設済みの光ファイバ網で端局装置を置き換えることでシステム性能を満たす必要があるが、25/50Gbpsの伝送を10Gbpsと同等の符号誤り率で行うためには、送信側、受信側共に光デバイスの大幅な性能向上が求められる。

5Gや光アクセスシステムに用いられる光デバイスは、屋外に設置されることを想定して、湿度及び幅広い温度範囲に対応できる気密封止パッケージに収めることが要求され、特にその中でも製造コストが低く、従来、光通信用途に多用されてきたCAN型パッケージに組み込まれること

が一般的である。当社では、システムの高速化に対応してチップと並行してパッケージも高速化を遂げており、広帯域化に合わせて4段階の光強度への変調によって単位時間当たりの伝送容量を倍増できるPAM4(Pulse Amplitude Modulation-4)変調を採用することでDFB-LD対応では50Gbps、EML対応では100Gbpsまで製品化を実現している。

大規模なデータセンターで使用される伝送システムでは、多くの光トランシーバを収容するため、空調を含む全体の消費電力低減が大きな課題である。光トランシーバ内部ではデジタル信号処理用プロセッサ(Digital Signal Processor : DSP)の消費電力低減と光デバイスの動作温度範囲拡大が並行して進められている。信号が更に高速化されると、IT機器内でも電気信号伝送路の損失や帯域不足が著しくなり、これをDSPの演算で補償するための電力量が急激に増大する。この抑制には、エネルギー損失の大きい電気信号線路を光へ置き換えることが必要であり、これを実現できる高密度実装性と低消費電力動作を兼ね備えた次世代光デバイスが必要になる。データセンター向け光デバイスとしては、化合物半導体のDFB-LD、EMLだけではなく、シリコン基板上に光導波路、光変調器、受光素子を集積化し、別途、化合物半導体で作製したDFB-LDチップを接着した、シリコンフォトンクスと総称される集積機能デバイスが市場投入され、データセンター向け短距離通信用光デバイスとして商用化されている。

3.2 今後の展望

国内のデータセンターの消費電力は、2030年には、2018年比で6.4倍になると予測されている⁽³⁾。2030年までに新設データセンターの30%省エネルギー化が政府方針として掲げられており⁽⁴⁾、光デバイスでは、高速化や多値化による1ビット当たりの消費電力低減が追求されていく。化合物半導体は、シリコンフォトンクスで実現できない高効率発光デバイスの機能を今後も引き続き担いつつ、光変調デバイスとしては、今後もシリコンデバイスと性能を争う。化合物半導体と比較して、シリコンは微細加工技術が進んでいるために光導波路の集積化が容易で、ウェーハ大口径化によるコスト低減の利点はあるが、本質的に光との相互作用が弱い材料なので、変調器の大型化を避けられず、今後見込まれる更なる高速化への対応には原理的な困難が予想される。一方、化合物半導体は優位な材料物性を生かした性能向上が可能であり、設計の自由度も高いため、今後の更なる高速化に最適な選択肢であると考えられる。シリコン材料による低コスト集積性と化合物材料による高効率発光、高速変調の利点を融合したデバイスの進展も期待される。当社光デバイスは光通信インフラ市場で高い信頼性を確保してきた実績があり、これを支える高度な製造技

術を今後のデータセンター市場向けなどの製品に展開することで、将来の高速変調、超高信頼度、低消費電力の要求に対応していく。

4. 赤外線センサ

4.1 市場・技術動向

可視光よりも波長の長い光を赤外線と呼び、中でも8～14μmの赤外線は、遠赤外線と呼ばれる。遠赤外線を測定し画像化することで、被写体温度の判別が可能であることはもちろん、暗視が可能であり、可視波長の外乱光の影響や、煙、霧など波長より小さい微粒子による散乱の影響を受けにくい。


赤外線センサは高画素・高分解能の赤外線カメラ用途と、低画素・低分解能の熱検知用途に分けられる。赤外線カメラは主に監視装置に使われ、熱検知用センサは照明の自動点灯、自動ドア、空調などに使われてきた。近年は、赤外線カメラの画像に簡単な画像解析を行うことで、防犯、室内見守り、人数カウント、スマートビルといった用途に加えて車室内見守りなどでも活用され市場が広がっている。

4.2 赤外線センサMeiDIRの展開

当社は、衛星からの地球観測目的で開発したサーマルダイオード赤外線センサ技術を活用し、高画素・高分解能な独自方式の赤外線センサを開発してきた。サーマルダイオード赤外線センサは、ボロメータ方式のセンサと比べて低コスト化が容易で、焦電センサやサーモパイル方式のセンサと比べて高画素化が可能でかつ高性能という特長がある。

このような特長を生かして、2019年、一般民生用向けに小型・低価格赤外線センサモジュール“MeiDIR”シリーズの最初の製品としてMIR8032B1を発売した。市場で一般的に採用されている16×16のサーモパイル方式の赤外線センサと比べて約10倍(80×32)の高画素化と5倍の温度分解能(100mK)を実現して、当社ルームエアコン“霧ヶ峰”の“ムーブアイ mir A.I.+ (ミライプラス)”などに採用された。さらに“より広い範囲で高精度で人・物の識別や行動把握を行いたい”という要望に対応して、MIR8032B1と同じセンササイズと温度分解能で従来製品の1.8倍の画角(78°×53°)と1.9倍の画素数(80×60)を実現したMIR8060B1の販売を2022年に開始した。AIを活用したサービスを提供する当社“MeiCare”や三菱電機インフォメーションシステムズ(株)の“kizkia-Knight”に採用され、プライバシーを考慮した見守りに活用されている。

さらに2022年から2023年にかけて、MIR8060B1と同じセンササイズと画角のまま、設備監視などの“より高い温



型名	MIR8060B1	MIR8060B3
モジュールサイズ	19.5×13.5×9.5(mm)	
画素数	80×60	
画角	78°×53°	
フレームレート	4fps/8fps	
温度分解能(NETD)	100mK(代表値)	400mK(代表値)
温度検知範囲	-5~60(℃)	-5~200(℃)
動作温度範囲	-20~85(℃)	

図4. MeIDIRシリーズの外観と主要諸元

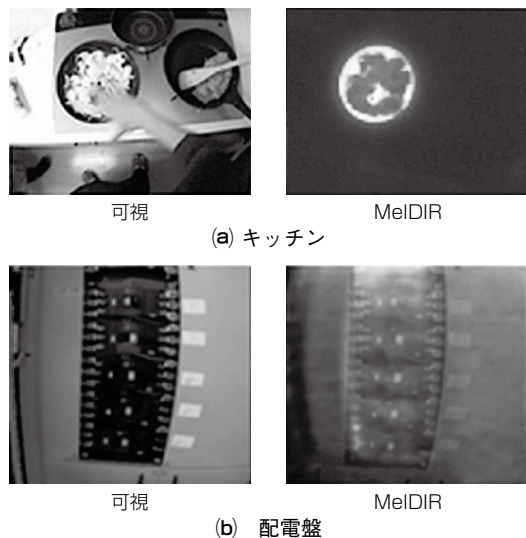


図5. MIR8060B3での撮像例

度の確認をしたい”という要望に対応したMIR8060B3を開発した(図4)。

MIR8060B3は従来60℃までしか判別できなかった熱源を200℃まで拡張することで、キッチンでの油の温度や、配電盤の異常発熱などの確認が可能になっており、防災など様々な分野への応用が期待される(図5)。

4.3 MeIDIRのユーザーサポートツール

MeIDIRは発売開始以来、顧客での評価や製品開発をサポートするためのツールの拡充を行ってきた。

図6に2022年にリリースを開始したMeIDIRの評価ボードの写真を示す。従来の評価ボードは汎用マイコンボードにMeIDIRを接続する形で提供してきたが、新評価ボードはマイコンを搭載した基板上にMeIDIRと熱画像の撮像に必要なシャッターなどを直接実装する構造にして、使い勝手の向上とともに顧客の実際に開発する製品に近い形態にした。また、評価ボードの設計情報もリファレンスデザインとして提供するため顧客の開発負荷低減が期待できる。

また、ソフトウェア面では従来のMeIDIRをマイコンで制御するプログラムとマイコンで読み出したデータをパソコン画面上で表示を行うプログラムに加えて、新たにマイ

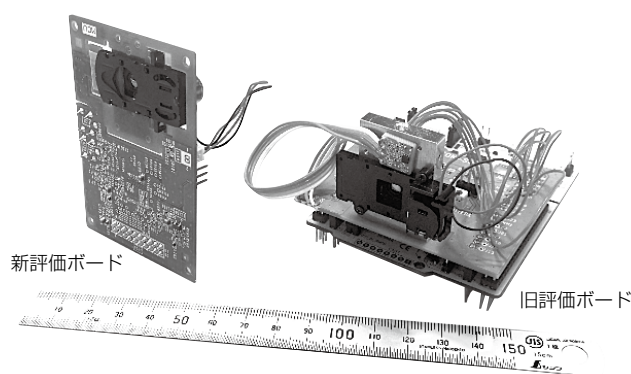


図6. 評価ボード

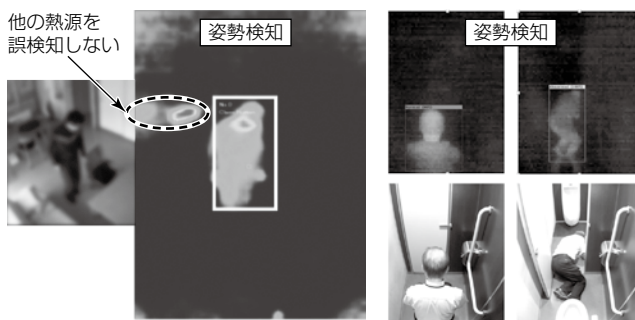


図7. MeIDIR+AIによる人検知例

コン上で動作可能なエッジAIによる人検知アルゴリズムの提供を開始して、MeIDIRを使用した人検知を容易にした(図7)。

このようにMeIDIR販売開始以来、ラインアップの拡充とユーザーサポートの強化を進めており、より広い範囲の社会課題の解決に貢献していく。

5. む す び

情報通信の進展を支える高周波・光デバイスの最新動向と将来展望について述べた。高周波・光デバイスは、DXの推進に不可欠なキーデバイスとして、ますますその重要性が増している。当社は、今後も時代に即応した先進的なデバイスを提供し続けることで、活力とゆとりある社会の実現を目指す。

参 考 文 献

- (1) 総務省 総合通信基盤局 電気通信事業部 データ通信課：我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計結果(2022年5月分)(2022)
https://www.soumu.go.jp/main_content/000828247.pdf
- (2) 総務省：デジタル田園都市国家インフラ整備計画(2022)
https://www.soumu.go.jp/main_content/000803507.pdf
- (3) 国立研究開発法人 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター：情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響(Vol.3)(2021)
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-04.pdf>
- (4) 首相官邸：成長戦略実行計画(2021)
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/ap2021.pdf>

5G基地局用広帯域 10W級GaN増幅器モジュール

10W Class, Wideband GaN Power Amplifier Module for 5G
Base - Stations

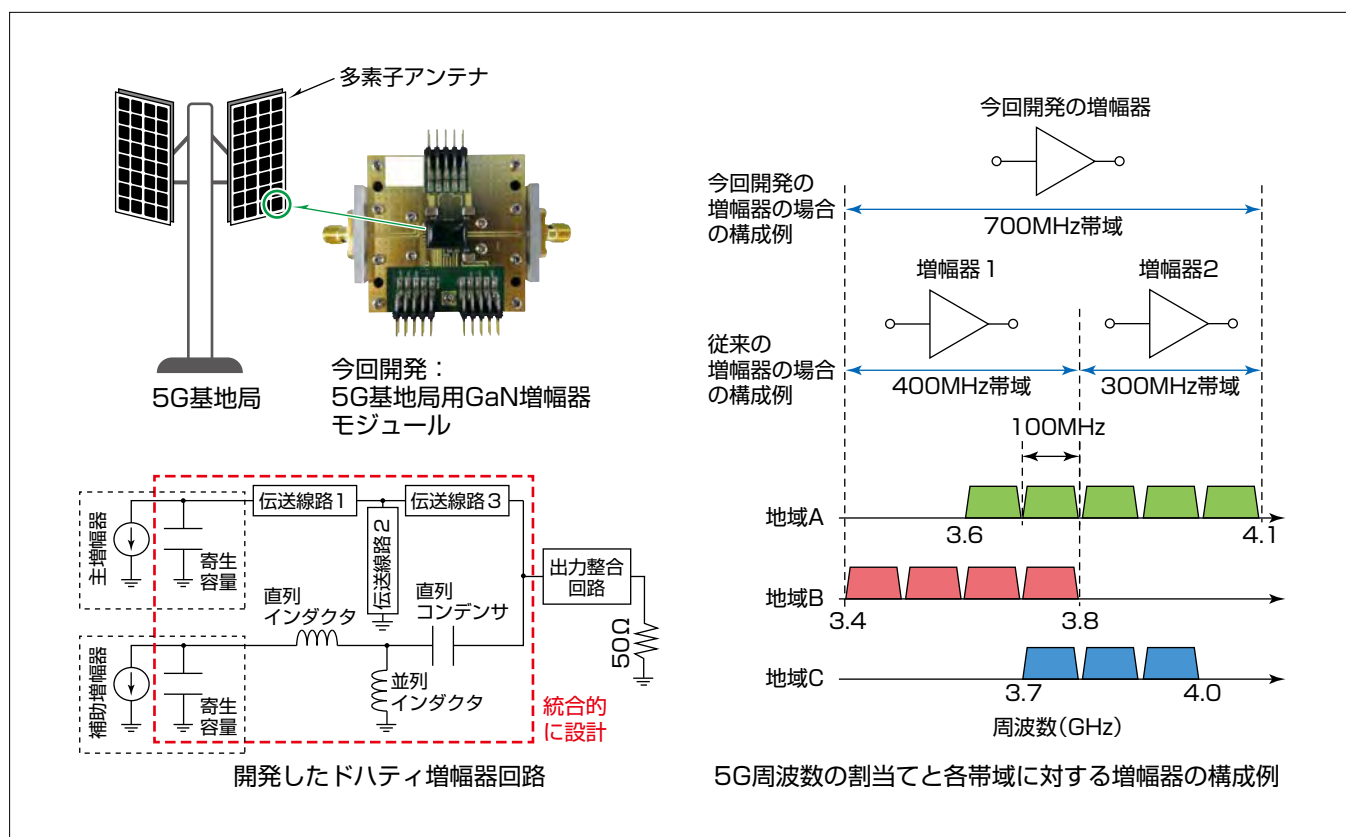
坂田修一*
Shuichi Sakata
田口巴里絵†
Marie Taguchi
寺西絵里‡
Eri Teranishi

嘉藤勝也‡
Katsuya Kato
小松崎優治*
Yuji Komatsuzaki

要 旨

近年、高速・大容量通信の需要に対応するため、第5世代移動通信システム(5G)の普及が拡大している。一つの増幅器モジュールで様々な周波数に対応できれば、5G基地局の無線装置ユニットの低コスト化や共用化に貢献できる。これまで増幅器モジュールの最終段に用いているドハティ増幅器が狭帯域であるため、このような広帯域化は困難であった。また、以前から小型・高効率・広帯域を実現する手法として提案されているT型回路をドハティ増幅器の主増幅器側に用いて、補助増幅器側には回路を配置せずに、トランジスタの寄生容量を利用してドハティ増幅器に特徴的なインピーダンス変調回路を構成する設計手法⁽¹⁾は、このモジュール構成の場合は補助増幅器側に回路を配置しなければならないため採用が困難であった。

そこで、主増幅器と補助増幅器側回路を統合的に設計することによって、従来の設計手法の利点を生かしつつ、より広帯域な動作を実現する新たな設計手法を用いて、10W級GaN(窒化ガリウム)増幅器モジュールを試作した。試作機を評価した結果、3.4~4.1GHzの700MHz帯域で、20MHz変調帯域の信号下で歪(ひず)み補償後の隣接チャネル漏洩(ろうえい)電力比(ACLR: Adjacent Channel Leakage Ratio)が-46dBcを満たした上で、42.0~44.6%の電力付加効率(PAE)と28.6~31.0dBの利得(Gain)を達成できたことを確認した。今回開発した設計手法を用いることで1台で3~4GHz帯に割り当てられている5G周波数のほぼ全ての帯域をカバーできる。



今回開発した5G基地局用GaN増幅器モジュールと、5G周波数の割当てと各帯域に対する増幅器の構成例

5G基地局用広帯域10W級GaN増幅器モジュールを試作した。従来の増幅器モジュールでは動作帯域が400MHz程度であったため、1台で3~4GHz帯の5G周波数の全てをカバーすることは困難であったが、提案する設計手法によって、700MHz帯域の動作が可能になり、1台で3~4GHz帯に割り当てられている5G周波数のほぼ全ての帯域をカバーすることが可能になった。

1. ま え が き

近年、高速・大容量通信の需要に対応するため、5Gの普及が拡大している。要旨の図右に示すように、3～4GHz帯に割り当てられている5G周波数は各国・地域によって700MHz程度の周波数範囲内に分布している。従来の増幅器モジュールを用いた場合、その動作帯域はせいぜい400MHz程度であるため、一つの増幅器で3～4GHz帯の5G周波数の全てをカバーすることは困難であった。一つの増幅器モジュールで様々な周波数に対応できれば、5G基地局の無線装置ユニットの低コスト化や共用化に貢献できる。これまで増幅器モジュールの最終段に用いているドハティ増幅器が狭帯域であるため、このような広帯域化は困難であった。また、以前から小型・高効率・広帯域を実現する手法として提案されているT型回路をドハティ増幅器の主増幅器側に用いて、補助増幅器側には回路を配置せずに、トランジスタの寄生容量を利用してドハティ増幅器に特徴的なインピーダンス変調回路を構成する設計手法は、このモジュール構成の場合は補助増幅器側に回路を配置しなければならないため採用が困難であった。

本稿では、要旨の図左下に示すように、補助増幅器側に回路を配置した場合でも、主増幅器と補助増幅器側回路を統合的に設計することによって、従来の設計手法の利点を生かしつつ、より広帯域な動作を実現する新たな設計手法について述べる。この設計手法を用いて、10W級GaN増幅器モジュールを試作・評価した結果、3.4～4.1GHzの700MHz帯域で、20MHz変調帯域の信号下で歪み補償後のACLRが-46dBcを満たした上で、42.0～44.6%のPAEと28.6～31.0dBのGainを達成した。

2. ドハティ増幅器の新規回路設計手法

図1に設計したドハティ増幅器の回路図を示す。主増幅器と補助増幅器は電流源と並列寄生容量($C_{ds,m}$, $C_{ds,a}$)で理想的に表している。主増幅器と合成点の間には伝送線路で構成されるT型回路を配置し、それらの電気長及び特性インピーダンスをそれぞれ θ_1 , θ_2 , θ_3 , Z_1 , Z_2 , Z_3 としている。補助増幅器と合成点の間にも集中定数で構成されるT型回路を配置しており、それぞれ直列インダクタ L_{a1} , 並列インダクタ L_{a2} , 直列キャパシタ C_{a1} で構成されている。直列インダクタ L_{a1} はトランジスタへのワイヤを想定している。モジュールのように複数チップ構成の場合はワイヤでトランジスタと外部回路を接続

する必要があるため、補助増幅器と合成点に回路を配置しなければならない。

次に回路の動作原理について述べる。本稿で提案する回路設計手法では、従来の回路設計手法と異なり、合成点でのインピーダンスが変成されていることが特徴である。具体的には図1に示すように、合成点から出力側を見たインピーダンスが $\gamma \cdot (R_{opt,m}/R_{opt,a})$ に変成されており、従来の回路設計では $\gamma = 1$ だが、この回路設計手法では $\gamma > 1$ とすることが、補助増幅器側に回路を挿入しているために可能である。ここで γ はインピーダンス変成比を、 $R_{opt,m}$, $R_{opt,a}$ は主増幅器と補助増幅器の最適負荷をそれぞれ表す。ドハティ増幅器として動作するには飽和時に、主増幅器と補助増幅器の両方が最適負荷($R_{opt,m}$, $R_{opt,a}$)にそれぞれ整合する必要がある。この回路の場合、図1(b)に示すように、合成点に互いに打ち消し合うバーチャル並列キャパシタ(C_{vir})とバーチャル並列インダクタ(L_{vir})を装荷する等価回路変換を施すと動作を容易に理解できる。これらのバーチャル成分を合わせて主増幅器と補助増幅器の両方について、インピーダンス変成比 γ になるインピーダンス変成回路を構成している。一方、バックオフ時にドハティ増幅

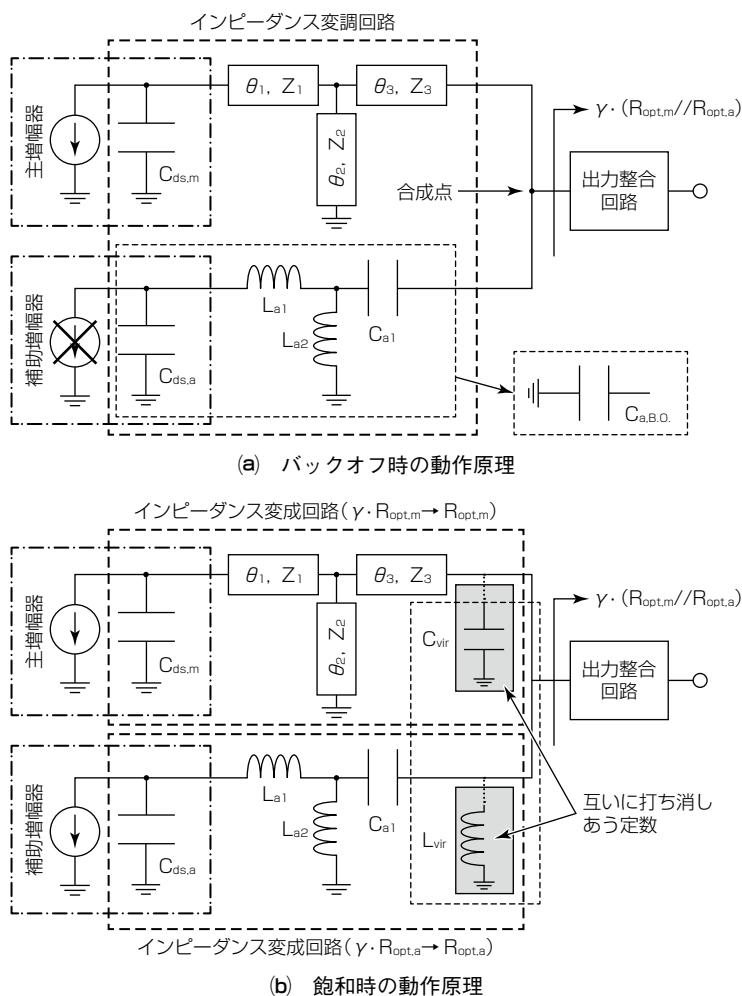


図1. 設計したドハティ増幅器の回路図

器として機能するには、合成回路が主増幅器にとってインピーダンス変調回路として機能しなければならない。図1(a)に示すように、バックオフ時には補助増幅器は動作を停止しているため、補助増幅器側電流源はオープンになる。このとき、補助増幅器側回路の $C_{ds,a}$ 、 L_{a1} 、 L_{a2} 、 C_{a1} の四つの要素で等価的に並列キャパシタ($C_{a,B.O.}$)として表すことができる。この等価的並列キャパシタ($C_{a,B.O.}$)と主増幅器側のT型回路、主増幅器側寄生容量($C_{ds,m}$)でドハティ増幅器に特徴的なインピーダンス変調回路を構成することが可能である。このように、この回路によってドハティ増幅器として機能することが可能である、しかし、これらの飽和時とバックオフ時の動作条件を満たす回路定数を見いだすのは容易ではない。そこで、図1に示す条件を満たす回路方程式を立式した。この場合、回路の Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 L_{a1} 、 γ 、 C_{vir} の値を固定した場合には、そのほかの回路パラメータ(θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 L_{a2} 、 C_{a1})は解析的に一意に定めることができる。ここで Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 L_{a1} モジュールの構成によって決定されるため、モジュール構成が決定し回路設計の段階になると、任意に選択できない。したがって、回路設計の段階では γ 、 C_{vir} を任意に選択できる。しかし、全ての γ 、 C_{vir} の組合せでドハティ増幅器として動作する解があるわけではなく、解のある組合せは限られていることが回路解析によって分かった。さらに解のある組合せのうち、 γ を大きくする方が広帯域に整合が取れるこ

とが分かった。図2に電流源モデルを用いてドハティ増幅器のインピーダンス変調の周波数特性をシミュレーションした結果を示す。図2(a)(b)には主増幅器側インピーダンス(Γ_{main} 、 $\Gamma_{main(B.O.)}$)と補助増幅器側インピーダンス(Γ_{aux})を、それぞれ最適負荷で規格化されたスミスチャート上に示している。主増幅器側インピーダンスに関しては、それぞれの周波数でのインピーダンス軌跡を細い実線で、バックオフ時のインピーダンスの周波数特性を太い実線で示している。図2(c)(d)にはそれぞれのインピーダンスの最適負荷に対する反射係数の絶対値の周波数特性を、主増幅器に関しては飽和時(細い実線)とバックオフ時(太い実線)について、補助増幅器に関しては飽和時(破線)だけについて示している。このシミュレーションに用いている γ 以外のパラメータは次のとおりである。

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = R_{opt,m}, \quad C_{vir} = 0.9 \cdot C_{ds,m}$$

図から、 $\gamma = 1.8$ のときにより広帯域な整合が得られていることが分かる。特に主増幅器の飽和時のインピーダンスに関して広帯域な特性が得られていることが分かる。このことから、この回路設計手法によって、従来($\gamma = 1.0$)よりも広帯域なドハティ増幅器としての動作が可能であることが分かる。

3. 5G基地局用広帯域10W級GaN増幅器モジュールの試作と評価結果

2章での回路設計手法を用いたドハティ増幅器を最終段に持つ5G基地局用広帯域10W級GaN増幅器モジュールの設計・試作を行った。図3に設計・試作を行ったモジュールを示す。モジュールの実効的なエリアは76mm²である。図4に3.9GHzのパルス変調信号を用いて評価した結果を示す。図の縦軸は、最終段ドハティ増幅器のドレイン効率(DE(final))と、

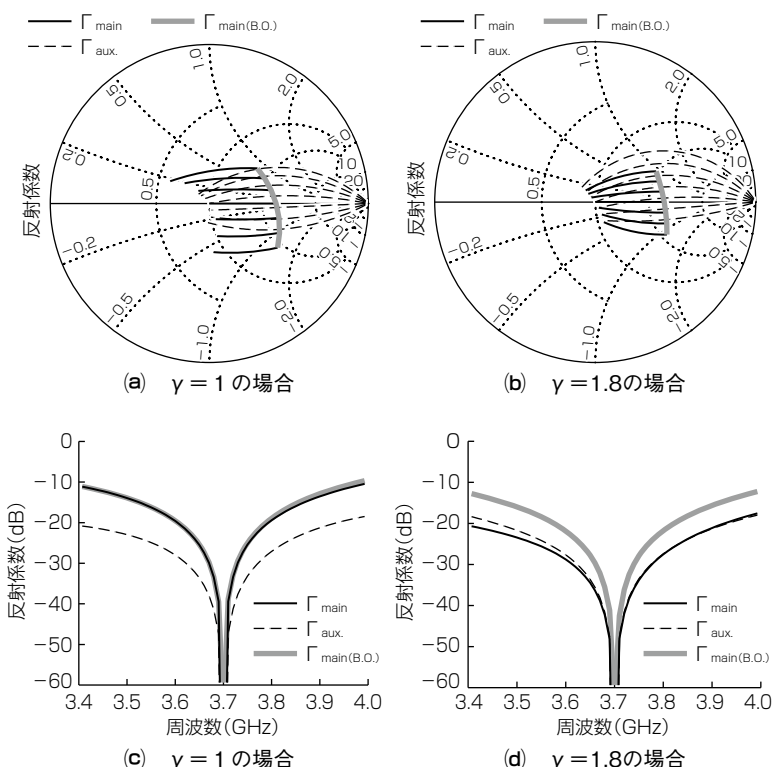


図2. 電流源モデルを用いてドハティ増幅器のインピーダンス変調の周波数特性をシミュレーションした結果

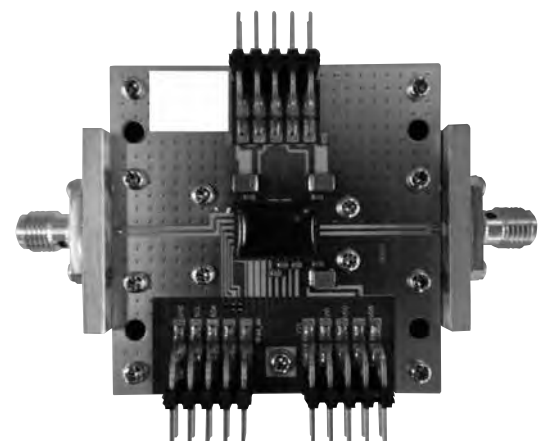


図3. 設計・試作を行った5G基地局用広帯域10W級GaN増幅器モジュール

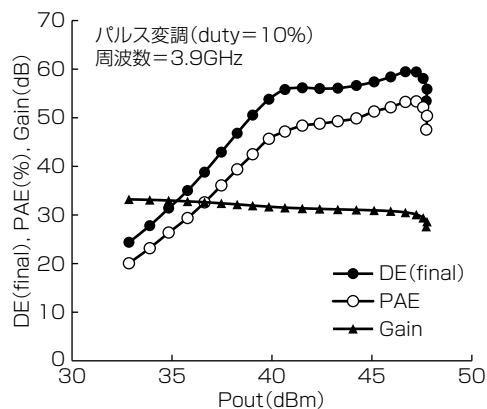


図4. 3.9GHzのパルス変調信号で評価した結果

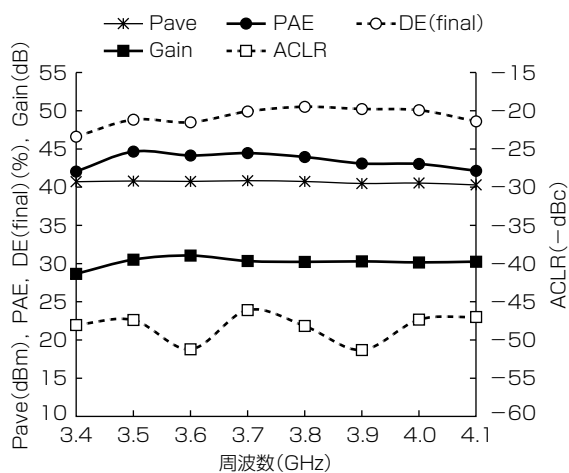


図5. 20MHzの変調帯域, 7.5dBのPAPRを持つ変調波信号を用いて評価した結果の周波数特性

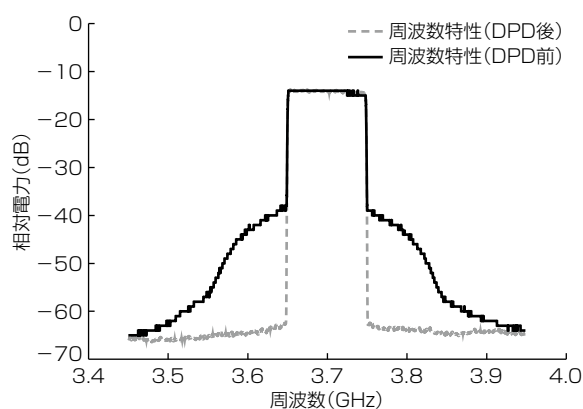


図6. 5G NR 100MHzの変調信号を用いてDPD評価をした結果

表1. この設計の増幅器と3～4GHz帯の他の増幅器の比較

増幅器	周波数 (GHz)	ドレイン効率 (%)	PAE (%)	変調帯域 (MHz)	PAPR (dB)
参考文献(2)	3.3～3.6		40.0	20	7.2
参考文献(3)	3.4～3.8	50.4～54.8	42.9～47.8	20	8.0
参考文献(4)	3.0～3.6	45.9～50.2		20	7.5
今回開発	3.4～4.1	46.6～50.5	42.0～44.6	20	7.5

が分かる。このことから、この設計手法の有効性を示すことができた。

4. む す び

3～4GHz帯の5G周波数のほぼ全てを一つの増幅器でカバーするために、従来の設計手法の利点を生かしつつ、より広帯域な動作を実現する新たな設計手法について述べた。この設計手法を用いて、10W級GaN増幅器モジュールを試作・評価した結果、3.4～4.1GHzの700MHz帯域で、20MHz変調帯域の信号下で歪み補償後のACLRが-46dBcを満たした上で、42.0～44.6%のPAEと28.6～31.0dBの利得を達成した。また他増幅器と比較して最も広帯域な特性を得たことから、この設計手法の有効性を示すことができた。

参 考 文 献

- (1) Gustafsson, D., et al. : A wideband and compact GaN MMIC Doherty amplifier for microwave link applications, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (2013)
- (2) Maroldt, S., et al. : 3.5-GHz ultra-compact GaN class-E integrated Doherty MMIC PA for 5G massive MIMO base station applications, European Microwave Integrated Circuits Conference (2017)
- (3) Sakata, S., et al. : A fully-integrated GaN Doherty power amplifier module with a compact frequency-dependent compensation circuit for 5G massive MIMO base stations, IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (2020)
- (4) Komatsuzaki, Y., et al. : 3.0-3.6 GHz wideband, over 46% average efficiency GaN Doherty power amplifier with frequency dependency compensating circuits, IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (2017)

データセンター向け広動作温度範囲 CWDM 100Gbps EML

東 祐介*
Yusuke Azuma
丹羽顕嗣†
Akitsugu Niwa
尾上和之*
Kazuyuki Onoe

恵良淳史*
Atsushi Era
森田佳道*
Yoshimichi Morita

Wider-temperature-range CWDM 100Gbps EML Chip for Data Centers

要 旨

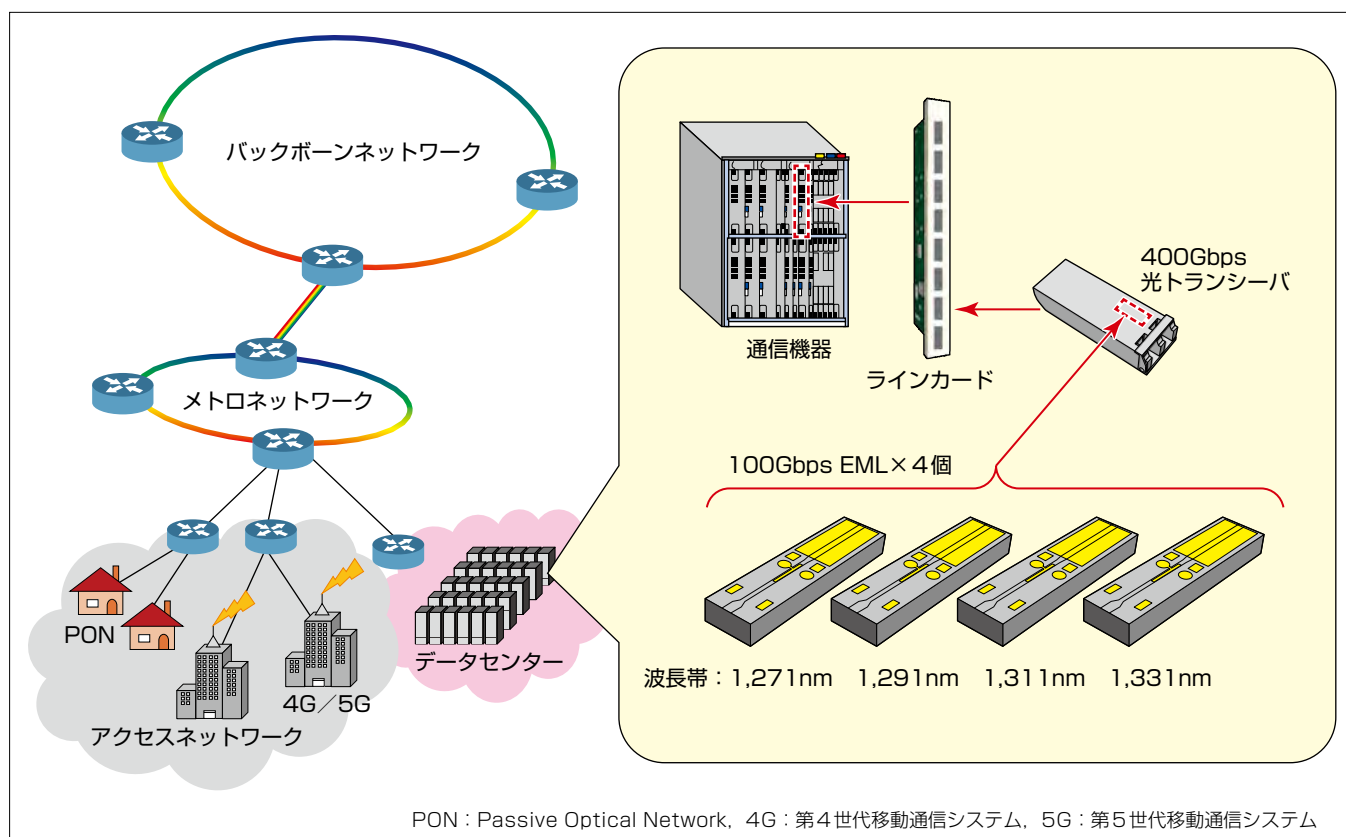
スマートフォン、タブレットなどの普及や情報のクラウド化によるデータ通信量の急速な増加に伴い、データセンターのネットワーク通信速度の高速化(400Gbps)と大容量化が進んでいる。

一方で、データセンター内に設置される通信機器などの消費電力の増加が大きな課題になっている。

この課題解決のためには、温度調整が不要で広い温度範囲で動作するEML(Electro-absorption Modulated Laser)を用いることが有効で、一部のデータセンターではチップ温度(T_{LD}) 5~85℃での動作が必要とされている。400Gbpsの光通信には、1波長当たり100Gbpsで動作するCWDM(Coarse Wavelength Division Multiplexing) 4波長のEMLチップを用いて、波長多重方式で400Gbpsのデータ通信

を実現する方式がMSA(Multi Source Agreement)で制定されている。

今回、広動作温度範囲CWDM 100Gbps EMLチップを開発し、1波長当たり100Gbpsの高速動作と広動作温度範囲の両立のため、三菱電機独自のハイブリッド導波路構造を採用し、レーザ部(LD)、EA(Electro-Absorption)変調器部の設計パラメータを最適化することで、チップ温度5~85℃の広い動作温度範囲で目標仕様を満足する良好な特性を得た。これによって、データセンター内のシステム構成部品である光トランシーバ内に従来必要であったEMLの温度調整用のTEC(ThermoElectric Cooler)が不要になり、データセンターの消費電力とコストを低減できる。



データセンター400Gbps光通信へのCWDM4波長100Gbps EMLの適用例

EMLは、分布帰還形レーザ(レーザ部)と電界吸収(EA)型光変調器の二つのデバイスを一つの半導体基板上に集積したもので、分布帰還形レーザ単体と比較して高消光比、高速動作及び長距離伝送に優れる。近年のクラウドサービスの普及によってデータセンターの通信トラフィックが増大しており、1チップで100Gbps通信が可能なEMLチップを四つ搭載した400Gbps光トランシーバが使われている。

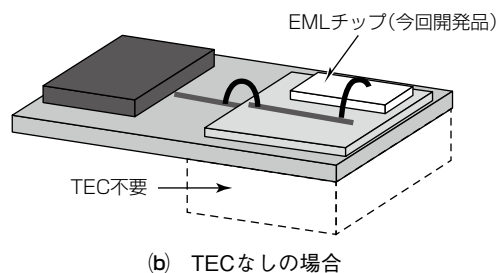
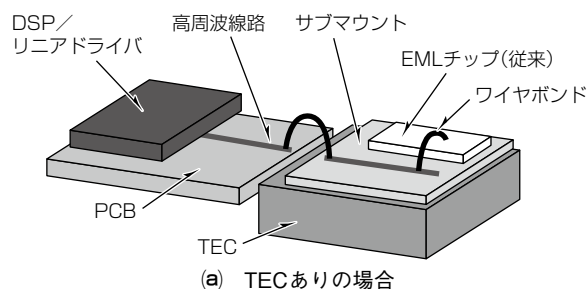
1. ま え が き

スマートフォン、タブレットなどの普及や情報のクラウド化によるデータ通信量の急速な増加に伴い、データセンターのネットワーク通信速度の高速化(400Gbps)と大容量化が進んでいる。

一方で、データセンター内に設置されるサーバやルータ、光ファイバ通信機器などの消費電力の増加が大きな課題になっている。データセンターでは多数の伝送装置の駆動とその冷却のための消費電力が膨大になっていることから、低消費電力化の要請が非常に強い。さらに、システム普及のためには伝送装置の低コスト化も非常に重要になっている。

これらの課題に対応するには、EMLの温度調整が不要で、広い温度範囲で動作するEMLを用いることが有効で、100Gbpsで動作する4波長のEMLチップを用いて、それぞれの光信号を合波する波長多重方式で400Gbpsのデータ通信を実現する方式がMSAで制定されている⁽¹⁾。四つの波長は、図1に示すように、波長間隔を20nmとして各々の波長許容幅を13nmとしたCWDM規格が用いられる。これまで当社は、チップ温度25～75℃の範囲で温度調整不要で動作する1波長50Gbps対応のEMLを開発してきたが、一部のデータセンターでは、更に温度範囲の広い $T_{LD} = 5 \sim 85^\circ\text{C}$ で温度調整なしで動作するEMLチップが必要とされており、また400Gbps伝送のために1波長当たり100Gbpsの動作も求められている。

今回、伝送速度400Gbpsの大容量高速光ファイバ通信で使用される半導体レーザダイオードチップとして、5～85℃の広い動作温度で駆動するEMLチップを開発し、良好な光波形品質を得ることに成功した。図2に光トランシーバの内部構造概念図を示す。従来のEMLチップで100Gbps伝送するにはTECでの温度調整が必要であったが(図2(a))、今回開発のEMLチップでは温度調整用



DSP : Digital Signal Processor, PCB : Printed Circuit Board

図2. トランシーバ内部構造概念図

のTECを削減でき(図2(b))、データセンター用途トランシーバの消費電力とコストを低減できる。

2. EMLチップ設計

2.1 広帯域化設計

図3にEMLの素子構造を示す。レーザ部は高温駆動時の光出力低下が課題であるため、高温特性に優れる埋め込み構造(図3(b))を採用した。EA変調器部は高消光比・広帯域の特長を持つハイメサ構造(図3(c))として、素子全体は埋め込み構造のレーザ部とハイメサ構造のEA変調器部をモノリシック集積した当社独自のハイブリッド導波路構造を採用した(図3(a))⁽²⁾⁽³⁾。今回の100Gbpsの高速動作のためには、EA変調器の容量低減による広帯域化と消光比確保の両立が必要になる。容量を低減し高い帯域を得るためには、EA変調器長を短くすることが望ましいが、EA変調器を短くすると、消光比が減少するトレードオフ関係がある。ハイメサ構造は他のリッジ型や埋め込み構造と比べてEA吸収層に閉じ込められる光の割合を大きくできるので、短い変調器長でも高い消光比を得ることが可能である。そのため今回は帯域と消光比のトレードオフ関係を緩和できるハイメサ構造を採用した。EA変調器長は従来よりも短尺化して容量の低減を行うが、トレードオフになる消光比は100G Lambda MSAのFR4規格⁽¹⁾を満足する設計を行った。またEA変調器の先にはスポットサイズ変換器を搭載することでシングルモードファイバへの結合効率を向上させている。

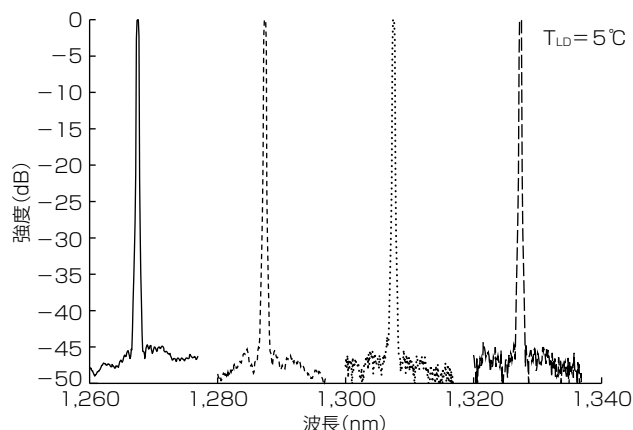
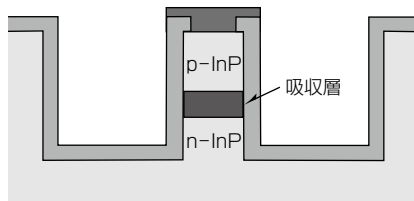
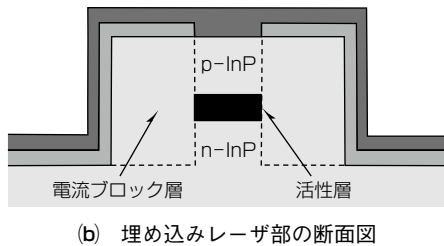
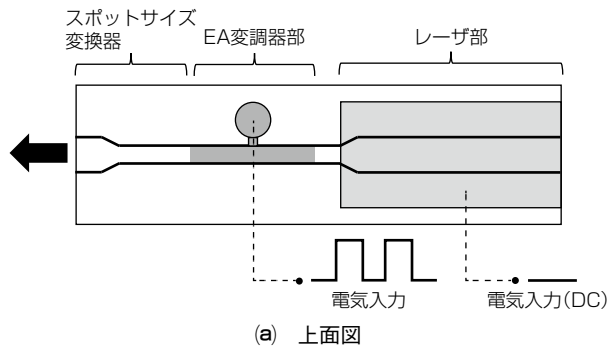


図1. CWDM 4波長のEML発振波長スペクトル ($T_{LD} = 5^\circ\text{C}$, $P_o = 6.5\text{mW}$)



(c) ハイメサEA変調器部の断面図

図3. EMLの素子構造図

2.2 広動作温度範囲化設計

EA変調器の吸収層には、通常、多重量子井戸構造が用いられる。量子井戸に電界を印加することによって光の吸収スペクトルが長波長側にシフトする現象(量子閉じ込めシュタルクシフト)を用いて、光のオン/オフを制御する。図4のように、レーザ部からEA吸収層に入射された光が、無電界時には通過するが、電界を印加した場合は、量子閉じ込めシュタルクシフトによってバンドギャップエネルギーが狭まって光を吸収するようになる。図5は、EA変調器の吸収スペクトルの概念図である。レーザの発振波長に対して、無電界時はレーザ発振波長での吸収係数が小さいので光はほとんど吸収されず通過するが、電界印加時は、量子閉じ込めシュタルクシフトによって、光の吸収スペクトルが長波長側にシフトし、レーザ発振波長での吸収係数が増大するため、光は吸収される。EA変調器の特性は、無電界時の吸収スペクトルの第一のピーク(エキシトン吸収ピーク)とレーザ発振波長のディチューニング量(以下“ $\Delta\lambda$ ”という。)によって大きく変化する。通常範囲では、 $\Delta\lambda$ が小さいほど消光比が大きく光出力は小さくなり、 $\Delta\lambda$ が大きいほど消光比が小さく光出力は大きくなる。広い温度範囲で所望の特性を得るためには、この $\Delta\lambda$ を適切

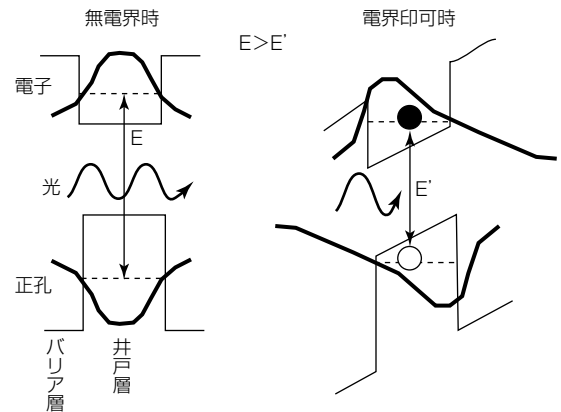


図4. EA変調器吸収層のエネルギーバンド構造概念図

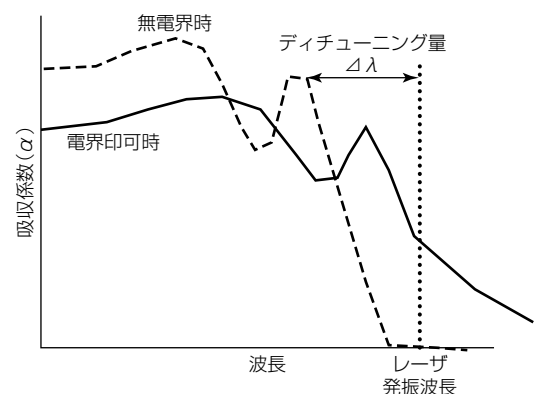


図5. EA変調器の吸収スペクトル概念図

に設定する必要があるが、EA吸収スペクトルは $0.5\text{nm}/^\circ\text{C}$ 程度で変化するのに対して、レーザ発振波長は $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ 程度で変化するため広い温度範囲で特性を満足することが難しい。低温側では $\Delta\lambda$ が大きくなり、所望の消光比を得るためには印加する電圧を大きくする必要があるが、大きな電圧を加えるとエキシトン吸収ピークが崩れて、消光比が減少する問題もある。今回は吸収層の多重量子井戸設計を工夫することと、 $\Delta\lambda$ を適切に設計することでこれらの問題を解決している。高温側では、レーザの光出力が低下する問題もあるが、電流ブロック層構造を工夫することで高温 85°C 駆動時でも所望の光出力が得られるようにした。

3. EMLの評価結果

表1にEMLの目標仕様及び評価結果を示す。

3.1 周波数応答特性(S21)の評価結果

図6に今回開発品(1,311nm波長帯のチップ)の周波数応答特性(S21)を示す。チップを実装したサブマウントに直接RF(Radio Frequency)プローブをコンタクトして測定した。駆動条件は、チップ温度 $T_{\text{LD}} = 5^\circ\text{C}$ で、LD電流(I_{op}) = 40mA、EAオフセット電圧(V_{EA}) = -2.5V 、 $T_{\text{LD}} = 85^\circ\text{C}$

で $I_{op}=120\text{mA}$, $V_{EA}=-1.5\text{V}$ である。100Gbpsで動作させるためには一般的に35GHz以上の通過帯域が必要であるが、今回開発品の3dBカットオフ周波数は、5℃で53GHz、85℃で48GHzであり、100Gbps伝送に十分な帯域が得られている。

表1. EMLの目標仕様及び評価結果

項目	目標仕様	評価結果	
		5℃	85℃
発振波長	L0	1,264.5~1,277.5nm	1,267.5nm 1,274.4nm
	L1	1,284.5~1,297.5nm	1,287.4nm 1,294.6nm
	L2	1,304.5~1,317.5nm	1,307.5nm 1,314.6nm
	L3	1,324.5~1,337.5nm	1,327.4nm 1,334.4nm
3dBカットオフ周波数	$\geq 35\text{GHz}$	53GHz	48GHz
光変調振幅	$\geq 5.0\text{dBm}$ (チップ端)	8.0~8.6dBm	5.3~7.6dBm
変調時消光比	$\geq 3.5\text{dB}$	4.7~5.3dB	7.0~7.3dB
TDECQ	$\leq 3.4\text{dB}$	2.4~2.7dB	1.4~2.5dB

TDECQ : Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary

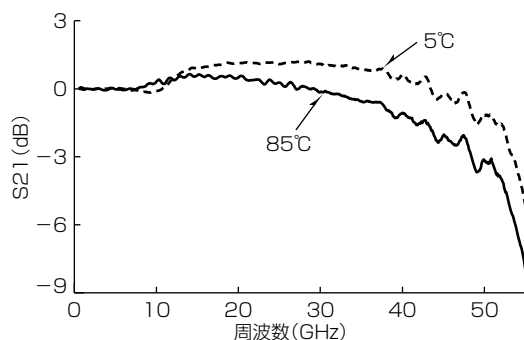


図6. 周波数応答特性(S21)

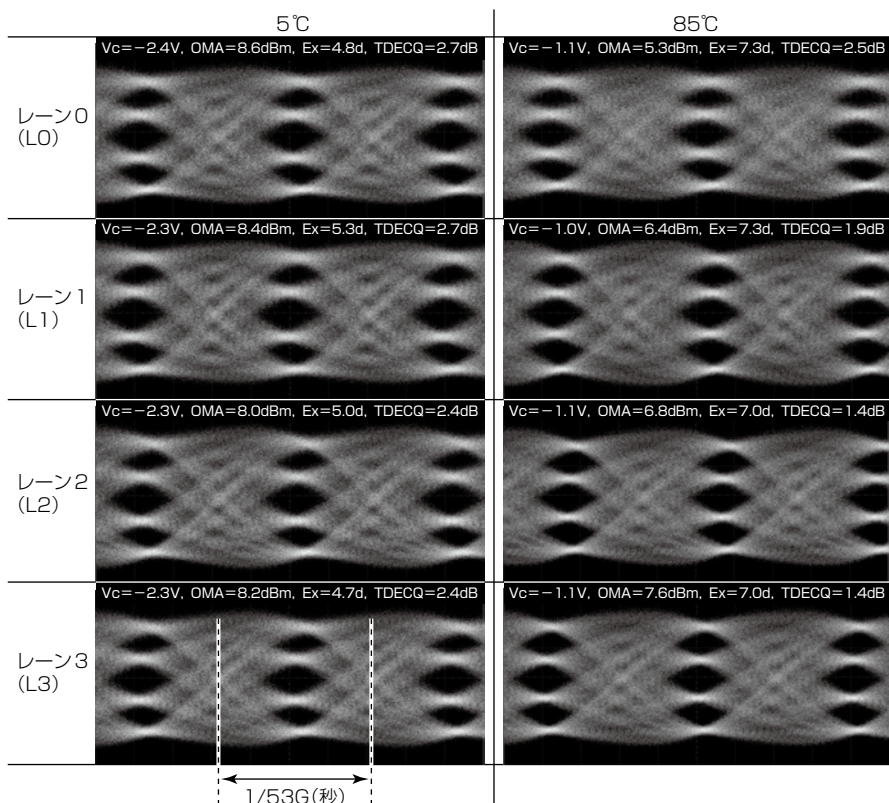


図7. 53.125Gbaud PAM4変調動作時の光波形

3.2 光波形の評価結果

図7にチップ温度5℃と85℃での波長帯ごとのBTB (Back to Back)の53.125Gbaud PAM4(Pulse Amplitude Modulation-4)変調動作時の光波形を示す。チップを実装したサブマウントに直接RFプローブをコンタクトして測定した。駆動条件は、ボーレート53.125Gbaud, EML変調電圧振幅(V_{pp})1.0V, $I_{op}=30\text{mA}@5^\circ\text{C}$, $120\text{mA}@85^\circ\text{C}$ である。EAセンターバイアス電圧(V_c)はそれぞれ図中に示したとおりである。評価の結果、チップ端光出力での光変調振幅(OMA: Optical Modulation Amplitude) 8.0~8.6dBm@5℃, 5.3~7.6dBm@85℃, 変調時消光比(Ex) 4.7~5.3dB@5℃, 7.0~7.3dB@85℃, TDECQ 2.4~2.7dB@5℃, 1.4~2.5dB@85℃が得られ、チップ温度5℃と85℃の広温度範囲で目標仕様を達成した。

4. む す び

今回、データセンター向け伝送速度400Gbpsの大容量高速光ファイバ通信で使用される半導体レーザーダイオードチップとして、チップ温度5~85℃の広い温度範囲で駆動するCWDM4波長EMLチップを開発した。高速動作と広動作温度範囲の両立のため、当社独自のハイブリッド導波路構造を採用し、レーザー部、EA変調器部の設計パ

ラメータを最適化することで、チップ温度5~85℃の広い動作温度範囲で目標仕様を満足する良好な特性を得た。これによって、データセンター内のシステム構成部品である光トランシーバ内に従来必要であったEMLの温度調整用のTECが不要になり、データセンターの消費電力とコストを低減できる。

参 考 文 献

- (1) 100G Lambda MSA
<https://100glambda.com/>
- (2) Morita, Y., et al.: 1.3 μm 28 Gb/s EMLs with Hybrid Waveguide Structure for Low-Power-Consumption CFP2 Transceivers, Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, America, paper OTh4H.5 (2013)
- (3) 大和屋 武, ほか: 次世代100GbEトランシーバ向けハイブリッド導波路型EMLの低電圧・高温動作, 電子情報通信学会総合大会2013, C-4-18 (2013)

第5世代移動通信システム基地局用 50Gbps DFBレーザ

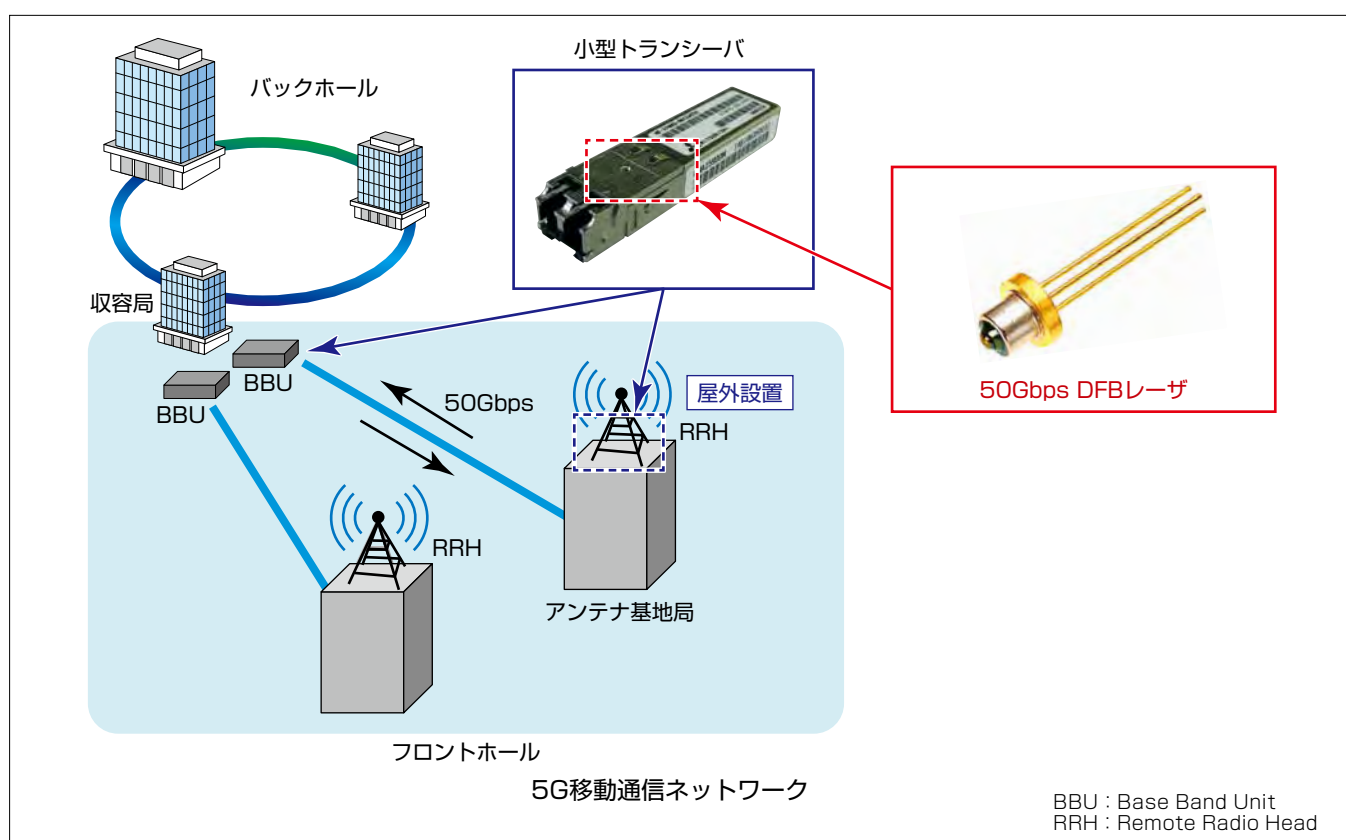
50Gbps DFB Laser Diode for 5G Base Stations

境野 剛*
Go Sakaino
島田 征明*
Masaaki Shimada
白尾 瑞基†
Mizuki Shirao

要 旨

携帯通信端末の普及や動画転送の利用拡大による移動通信でのデータ通信量増大を背景に、第5世代移動通信システム(5G)への移行が加速している。移動体通信でトラフィックが集中する5G移動通信ネットワークのフロントホールのアンテナ基地局に適用する伝送速度50Gbpsの光通信デバイスとして、26GbaudのPAM4(Pulse Amplitude Modulation-4)変調方式で直接変調動作するDFB(Distributed Feed Back)レーザが求められている。このDFBレーザは基地局の屋外に設置される通信機器内の小型トランシーバに搭載されるため、広い温度範囲での動作が必要である。また従来の25Gbps動作製品との外形寸法の互換性確保が重要である。

今回、これらの市場要求に対応するため、PAM4変調方式の動作に適した50Gbps DFBレーザチップと信号伝送線路を最適化した業界標準のTO-56CANパッケージを開発した。これによって、I-temp($-40\sim+90^{\circ}\text{C}$)で26Gbaud PAM4動作でTDECQ(Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary)として、10km伝送で1.3dB以下を得た。低消費電力動作で5G移動通信ネットワークのフロントホール対応の標準規格50GBASE-LR(26Gbaud PAM4)に適合する特性(TDECQ $\leq 3.2\text{dB}$, 10km伝送)を満たして、従来比2倍の高速化が可能になり、5Gの高速化と低消費電力化を実現できる。



5G移動通信ネットワークのフロントホールに適用する50Gbps DFBレーザ

アンテナ基地局に適用される光通信デバイスには広い温度範囲($-40\sim+90^{\circ}\text{C}$)での直接変調動作が求められるため、この条件に最適な25Gbps DFBレーザが使用されている。5G移動通信ネットワークのフロントホールに適用する伝送速度50Gbpsを可能にする26Gbaud PAM4動作50Gbps DFBレーザを熱電変換素子による温度調整が不要な業界標準のTO-56CANの外形寸法で実現した。

1. ま え が き

移動通信でのデータ通信量増大に伴う5Gへの移行が加速している。5G移動通信ネットワークのフロントホールのアンテナ基地局に適用する光通信デバイスは、通信機器内に内蔵される形で屋外に設置されるため、広い温度範囲での動作が求められる。さらに低消費電力動作の点で、熱電変換素子を必要にできて、直接変調動作が可能なDFBレーザが以前から使用されている。これまで適用されているDFBレーザの伝送速度は25Gbpsであり、データ伝送量を2倍の50Gbpsにするには、DFBレーザの変調速度を2倍にする、又は二つのDFBレーザを用いた並列伝送が考えられる。しかしながら、DFBレーザで広い温度範囲での高速動作化は技術的な課題が多く、また複数のDFBレーザを使用することはコストが増大する。一方、フロントホールに対応するため制定された標準規格50GBASE-LRでは、光強度を従来の2値から4値にするPAM4変調方式が提案されており、この方式ではDFBレーザの変調速度を2倍にせずとも50Gbps伝送が可能になる。

今回、PAM4変調方式の動作に適した50Gbps DFBレーザチップと信号伝送線路を最適化した業界標準のTO-56CANパッケージを設計し、製品を開発した。

2. DFBレーザの設計

当社ではこれまで -40°C から 90°C までの温度範囲で25Gbps動作するDFBレーザを製品化している。直接変調動作が求められるDFBレーザでは、レーザ特有の電気と光の相互作用の結果発生する光強度の振動による光変調波形の劣化抑制が重要である。この光強度振動の周波数は緩和振動周波数と呼ばれ、良好な光変調波形を得るには、全動作温度範囲で変調信号周波数と同程度の高い値を保つことが求められる。そのためには特に高温で顕著な光の損失や発光層への電流注入効率低下、発光層での光密度の低下を抑制する必要がある。またDFBレーザを搭載するパッケージでは、高周波電気信号の伝送線路の設計として、高周波特性の劣化を抑制するために内部インピーダンスの最適化が重要である。

今回、これらを考慮して光変調波形のシミュレーションを行ったので、その一例を用いてPAM4変調波形の特徴を述べる。シミュレーションモデルを図1、シミュレーション結果例を図2に示す。従来の25Gbps動作の

25GBASE-LR用途では、NRZ(Non Return to Zero)信号を使用し、25.78Gbaudで(約39psごとに)変化する2値のレベルを持った電気信号をDFBレーザに入力し、DFBレーザチップは2値のレベルを持った光信号を出力する。図2(a)は、LPF(Low Pass Filter)を通過後の光波形で、アイ開口部の最も内側の点線で囲まれた10角形はマ

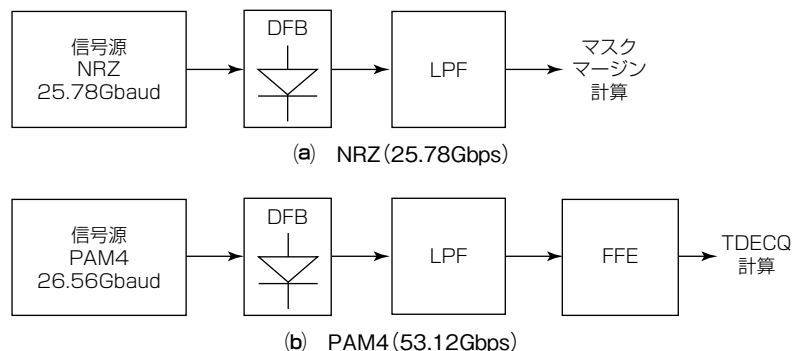


図1. 光変調波形のシミュレーションモデル

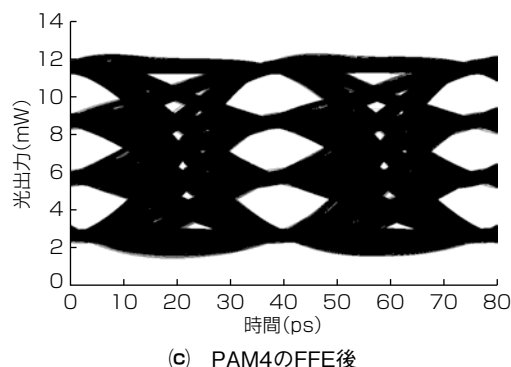
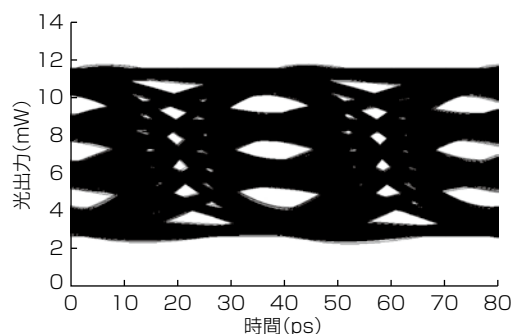
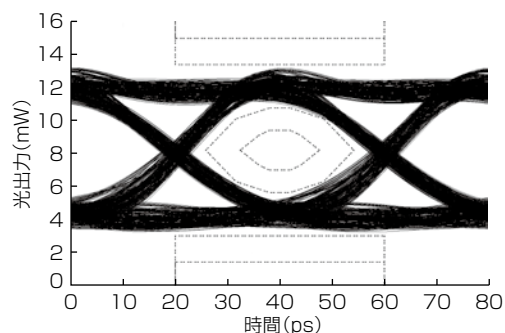


図2. 光変調波形のシミュレーション結果例

スクと呼ばれ、信号が存在しないようにすべき領域である。この領域を信号と接触するまで拡大したとき(Bit Error Ratio=5E-5を適用)の元のマスク領域との差はマスクマージンとされ、良好な波形では大きな値になる。

今回目標とする50GBASE-LR用途では、25Gbpsの2倍の伝送速度を得るために、PAM4と呼ばれる4値の信号レベルを使用する。26.56Gbaudで(約38psごとに)変化する4値のレベルを持った電気信号をDFBレーザに入力し、DFBレーザチップは4値のレベルを持った光信号を出力する。三つのアイ開口を持つPAM4信号の良否を判別する指標はIEEE802.3cd⁽¹⁾で規定されており、LPFとFFE(Feed Forward Equalizer)で波形整形された光変調波形から算出されるTDECQが用いられる。TDECQは雑音への耐性を数値化した値で、NRZ信号でのマスクマージンに相当し、小さいほど波形品質は良好で、IEEE802.3cdのTDECQ規格値は3.2dB以下である。

PAM4信号波形では4値を持つため、アイ開口が縦に3個並んで、近接2値のレベル間の振幅はNRZ信号の1/3になる。さらに、中間レベルの存在で信号遷移が複雑になり、NRZ信号と比較してアイ開口が非常に小さくなって、伝送誤りが発生しやすい。また、DFBレーザでは先に述べたように光強度の振動(緩和振動)が発生し、光変調波形へ悪影響を及ぼす。具体的には、光変調波形にオーバーシュートが発生し、図2(b)(c)のように、上部アイ開口が左側に動いて(進んで)、下部アイ開口が右側に動く(遅れる)。このようにDFBレーザ固有の緩和振動によって、波形品質が低下(TDECQが悪化)する傾向がある。さらに先に述べたように電気信号線路のインピーダンスの設計も重要なことから、緩和振動を考慮したDFBチップモデルと2017年に開発した25GbpsDFBレーザ⁽²⁾のパッケージを基本とした実装モデルを作成した。これを用いて今回、図2(b)(c)のようなシミュレーションを実施し、50Gbps DFBレーザのDFBレーザチップやパッケージを最適化設計した。

3. 素子構造と特性

今回開発した発振波長1,310nmの50Gbps DFBレーザの外観写真を図3に示す。CANパッケージの外形は、業界標準のφ5.6mm TO-56CANを採用し、従来製品との互換性確保や小型トランシーバ規格(SFP56)への適合を可能にしている。

電流光出力特性を図4に示す。低温-40℃から高温90℃へのしきい値電流やスロープ効率の変化が小さく、50GBASE-LRに対して十分な特性が得られている。特に高温90℃で、しきい値電流は20mA以下、スロープ効率は0.22mW/mA以上、最大光出力は12mW以上が得られ

ている。

PAM4伝送光変調波形の測定系を図5に示す。任意波形発生器を信号源として、電気信号増幅によって振幅不足を補い、バイアスティからバイアス電流を印加し、DFBへ差動電気信号を入力した。波長1,310nm付近にゼロ分散を持つシングルモード光ファイバを用いて伝送し、光波形はLPFやFFEを通過した後に観察し、TDECQはIEEE802.3cdに準拠した方法で計算した。また、Pre-Emphasis(DFBレーザ等の周波数特性を補正するようにあらかじめ電気信号の立ち上がりや立ち下がりを見直し補正強調、以下“PE”という。)することでTDECQ値を改善できる。近年のドライバICはPEの能力が向上して実用化段階であり、今回比較のためPE有無のそれぞれについて評価した。

I-temp温度範囲(-40～+90℃)でのPAM4伝送光変調波形を図6に示す。必要な緩和振動周波数の確保が難しい高温90℃、さらに低温-40℃でも、PE有無にかかわらず、大きなアイ開口が得られている。また光変調波形は20km伝送後でも乱れが少なく良好である。

TDECQの伝送距離依存性を図7に示す。PEなしの条件での-40℃、25℃及び90℃のときのTDECQは、伝送前



図3. 50Gbps DFBレーザ

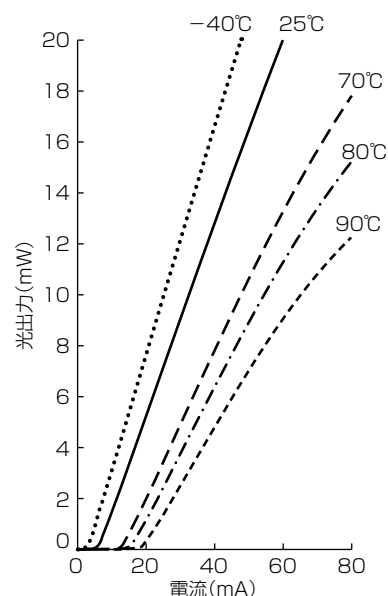


図4. 電流光出力特性

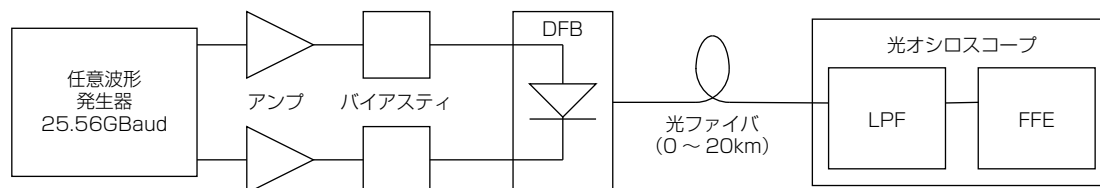


図5. PAM4伝送光変調波形の測定系

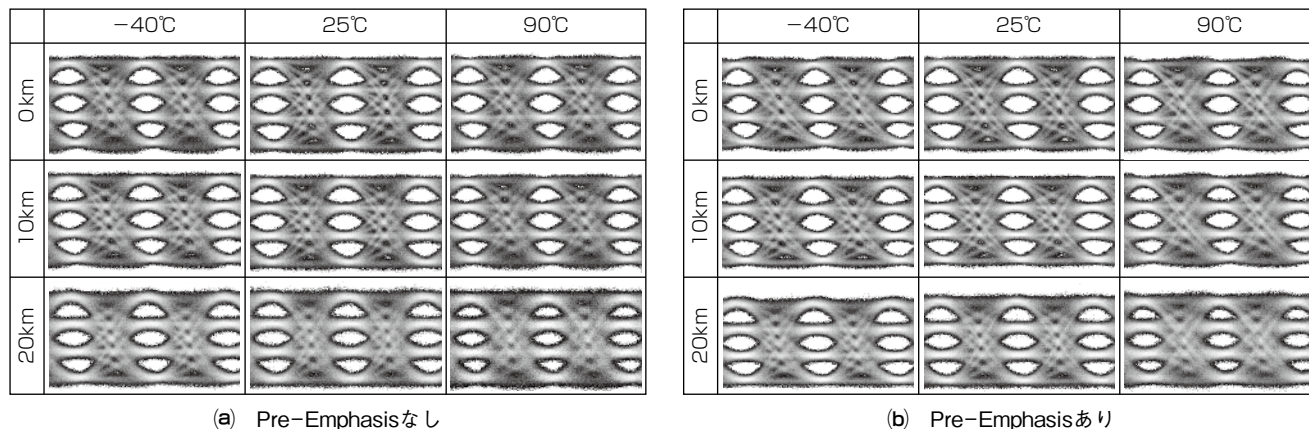


図6. PAM4伝送光変調波形

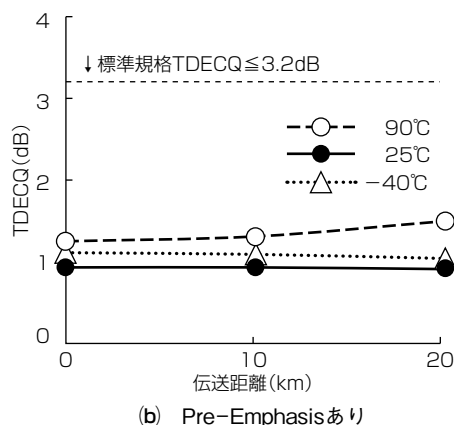
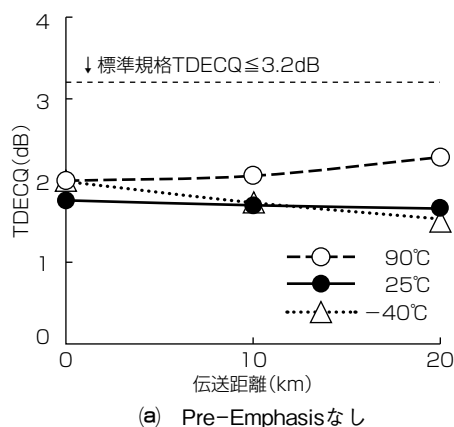


図7. TDECQの伝送距離依存性

(0 km)でそれぞれ2.3dB, 1.8dB及び2.0dB, さらに10km伝送後でも2.1dB, 1.7dB及び2.1dBであり, 50GBASE-LRが要求する10km伝送時でも, 標準規格値3.2dB以下

に対して十分に余裕がある特性になっている。またPEありの条件での-40℃, 25℃及び90℃のときのTDECQは, 10km伝送後でも1.1dB, 0.9dB及び1.3dBであり, PEを行うことで更にTDECQを向上させられることを確認した。

4. む す び

5G移動通信ネットワークのフロントホール向けにPAM4変調方式の動作に適した50Gbps DFBレーザを開発した。DFBレーザチップは必要動作温度範囲の-40~+90℃で必要な電流光出力特性や緩和振動周波数を満たし, この特性に整合するよう最適化設計した信号伝送線路を持つ業界標準のTO-56CANパッケージを用いて, 小型トランシーバでの規格互換性を確保した。PAM4変調時の良好な光変調波形によって, 5G移動通信ネットワークのフロントホールに対応する標準規格50GBASE-LR (TDECQ \leq 3.2dB, 10km伝送)を満たす特性(TDECQ \leq 1.3dB, 10km伝送)を実現した。これによって, 従来比2倍の高速化が可能になり, 5Gの高速化と低消費電力化を実現できる。

参 考 文 献

- (1) IEEE Standards Association : IEEE 802.3cd 50Gb/s, 100Gb/s, and 200Gb/s Ethernet Task Force
<https://www.ieee802.org/3/cd/>
- (2) 境野 剛, ほか: 25Gbps光通信用直接変調DFBレーザ, 三菱電機技報, 89, No.5, 265~268 (2017)

400Gデジタルコヒーレント通信用 1.55 μm 帯チューナブルDFBレーザ

1.55 μm Tunable DFB-LD for 400G Digital Coherent Optical Transmission System

永尾龍介*
Ryosuke Nagao
松本啓資*
Keisuke Matsumoto
上野貴寛*
Takahiro Ueno

奥畑 亮*
Ryo Okuhata
岡 俊英†
Toshihide Oka

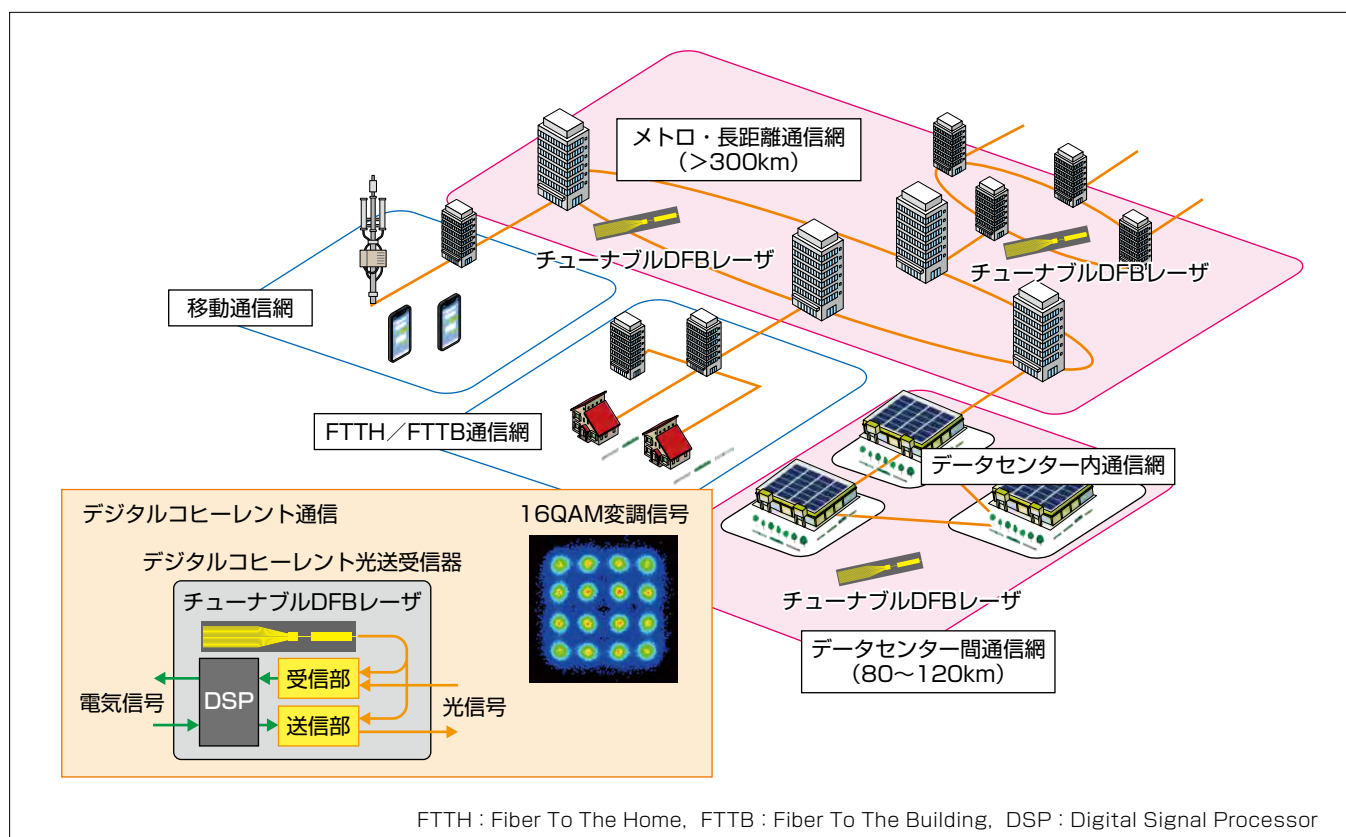
要 旨

第5世代移动通信システム(5G)の拡大や動画配信サービスの普及に伴い、通信ネットワークのデータ量は増加を続けている。通信ネットワークでは光ファイバを用いた光通信が用いられており、データ速度の向上や波長多重によって通信大容量化を支えている。最近では多値変調や光の偏波を用いて、変復調にデジタル信号処理を利用した16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)デジタルコヒーレント通信の適用が拡大しており、メトロ・長距離通信網やデータセンター間通信網で、従来の100Gbpsから400Gbpsへの高速大容量化が求められている。

デジタルコヒーレント通信では、光送信部の信号光源及

び光受信部の局発光源として、広帯域の波長可変半導体レーザが用いられている。

今回、三菱電機は簡易な制御で安定した光出力を実現できるDFB(Distributed FeedBack)アレー方式を採用し、400G対応1.55 μm 帯チューナブルDFBレーザを開発した。アレー化した発振波長の異なる16本のDFB-LD(Laser Diodes)と光強度を補うSOA(Semiconductor Optical Amplifier)を集積することで光出力 $\geq 17\text{dBm}$ 、SMSR(Side Mode Suppression Ratio) $\geq 45\text{dB}$ 、線幅 $\leq 300\text{kHz}$ 、波長範囲1,526.49~1,567.94nmを実現し、400Gbpsデジタルコヒーレント通信用途に好適な特性を得た。



チューナブルDFBレーザの適用市場

5Gの拡大や動画配信サービスの普及に伴い、メトロ・長距離通信網やデータセンター間通信網で、デジタルコヒーレント通信方式の適用が拡大している。従来の100Gbpsから400Gbpsへの高速大容量化が求められており、400G対応1.55 μm 帯チューナブルDFBレーザを開発した。

1. ま え が き

5Gの拡大や動画配信サービスの普及に伴い、通信ネットワークのデータ量は増加を続けている。通信データが集約され、大容量かつ長距離伝送が必要なネットワークの根幹部分では、伝送損失の小さい光ファイバを利用した光通信が用いられており、データ速度の向上や波長多重によって通信大容量化を支えている。最近では多値変調や光の偏波を用いて、変復調にデジタル信号処理を利用したデジタルコヒーレント方式⁽¹⁾が用いられており、1本の光信号で1.84Tbpsの通信容量を実現した報告⁽²⁾もある。

デジタルコヒーレント方式では光の位相状態を変更して信号を付加するQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)変調に加えて、光スペクトル強度にも信号を付加した16QAMや64QAM変調が用いられるため、光源には位相雑音が少なく光スペクトル線幅が細いことや十分な光強度も要求される。ほかにも光通信に必要な波長多重時のグリッドや波長安定度などの仕様も含めて、業界標準団体OIF(Optical Internetworking Forum)によってMicroITLA⁽³⁾(Integrable Tunable Laser Assembly)等の光源に対する仕様が提案されている。特に近年、メトロ・長距離通信網やデータセンター間通信網で、従来の100Gbpsから400Gbpsへの高速大容量化が求められている。

光源のキーパーツであるチューナブルレーザには外部共振器型、DBR(Distributed Bragg Reflector)型、DFBアレー型などがある。各方式の特徴を表1に示す。

外部共振器方式は共振器長を長く取ることが可能で比較的細い光スペクトル線幅を得ることが可能な一方で、波長可変量を大きくすることが難しい。DBR方式は小型で波長可変範囲を広く取りやすいが、高い波長安定度を実現するために低雑音で緻密な制御が必要になる。DFBアレー方式は複数のDFB-LD出力を合波するMMI(Multi-Mode Interference)などの挿入損によって高い光出力を得にくい一方で簡易な制御で再現性の高い光出力を得られるメリットがあるなど、方式によって特徴があり各社独自の方式で光源を実現している。

今回、デジタルコヒーレント通信用光源として、簡易な制御で安定した光出力を実現可能なDFBアレー方式を

採用し、光強度を補う半導体光増幅器(SOA)を集積したチューナブルDFBレーザML9CP61を開発した。

2. チューナブルDFBレーザ素子設計

開発したチューナブルDFBレーザの素子構造を図1に示す。波長の長期安定性、制御性に優れるDFB-LDアレー型を採用しており、チップサイズは3.8×0.75×0.1mmである。InP(インジウムリン)基板上に、発振波長の異なる16本のDFB-LDアレー、S字曲がり導波路、LDの光出力を出力ポートに結合させる16×1 MMI光カプラ、及び光カプラで発生する損失を補償し光出力を増幅するためのSOAが集積されている。

DFB-LDの選択とTEC(ThermoElectric Cooler)を用いたチップ温度調整の組合せによって発振波長変更を行い、光通信で用いられる1.55μm帯全域をカバーする。DFB-LD出射光波長の温度依存性は0.1nm/℃と小さく、アレー数が少ない場合、温度調整範囲を広く取る必要があり、TECの消費電力が増大する。アレー数が多いと、光カプラ部での損失は増大するものの、温度調整範囲を狭めることができ、低消費電力化に有利である。今回、アレー数を16として、温度調整範囲30℃(25~55℃)でOIF-IC-TROSA⁽⁴⁾及びOIF-400ZR-01.0⁽⁵⁾準拠の1.55μm帯(1,527.99~1,567.13nm)に対応するよう、各DFB-LDの回折格子ピッチを設計した。また、デジタルコヒーレント伝送に必要な発振線幅500kHz以下を実現するため、回折格子長を1.4mmに長尺化した。

16×1 MMI光カプラは、16本のDFB-LDとMMIの間の導波路損失を小さくするように、MMI形状及び入力側導波路位置を最適化した。

チップ前後端面からの反射戻り光低減のために、SOA導波路を傾斜させるとともに、チップ端面は無反射コーティング付き窓構造にしている。

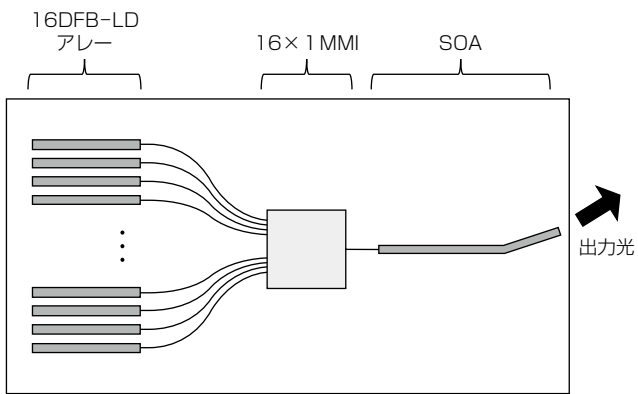


図1. チューナブルDFBレーザの素子構造模式図

表1. チューナブルレーザ方式

	光強度	線幅	波長可変	制御性
外部共振器型	△	○	△	△
DBR型	○	△	○	×
DFBアレー型	△	△	○	○

3. 素子特性

チューナブルDFBレーザのLD電流を220mA(チップ温度25℃)又は250mA(チップ温度55℃), SOA電流400mAで動作させた。16本のDFB-LDのチップ光出力特性を図2に示す。16本のDFB-LD間の光出力ばらつきは1 dB以下になっており, 1.55 μ m帯全域にわたって17dBm以上の光

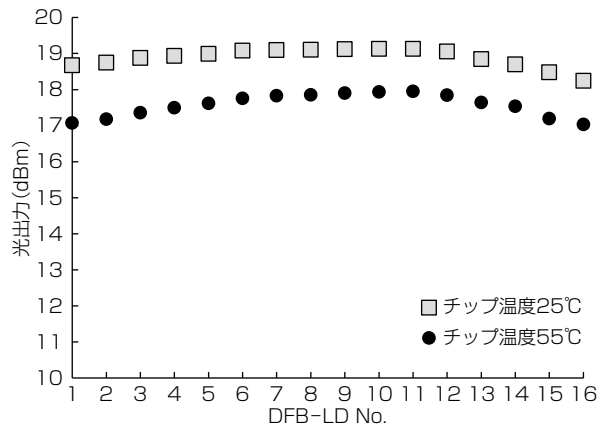


図2. チップ光出力特性

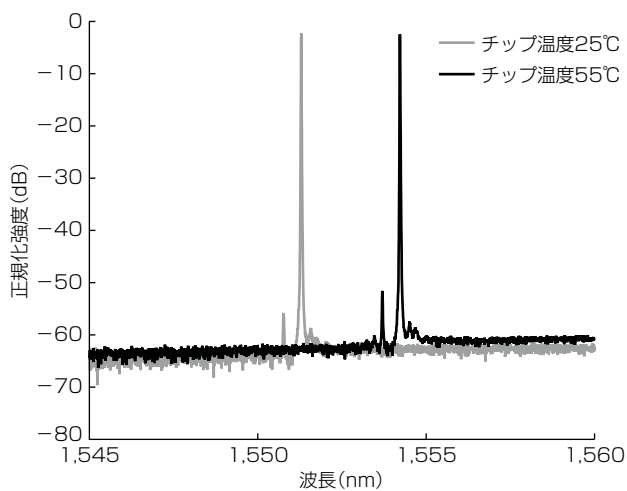


図3. 出力光スペクトル特性

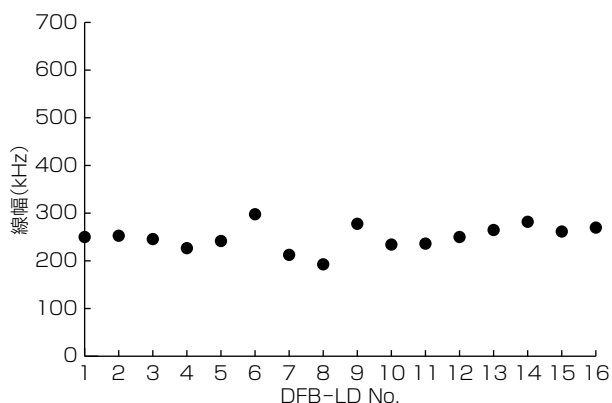


図4. 光スペクトル線幅特性

出力が得られることを確認した。

次に, DFB-LDアレーのうち1本を動作させた出力光スペクトル特性を図3に示す。チップ温度25℃及び55℃で動作させた結果を重ね書きしている。温度調整範囲30℃でのDFB-LD1本当たりの波長可変幅は2.9nmである。4章で述べるように, 16本のDFB-LDアレーを用いることでOIF-IC-TROSA及びOIF-400ZR-01.0をカバーする波長可変範囲を実現している。またSMSRは, 25~55℃の動作温度範囲で, 45dB以上を維持している。

図4に55℃, LD電流250mA, SOA電流400mAでの光スペクトル線幅特性を示す。受信器を用いて位相雑音スペクトルを測定し, 線幅は測定された位相雑音スペクトルの白色雑音成分から計算した。16本全てのDFB-LDで線幅は300kHz以下であり, 性能目標の500kHz以下の線幅を実現していることを確認した。

4. LDモジュール化

開発したチューナブルDFBレーザチップの波長可変範囲とそのときに必要になるTECの消費電力を確認するために, LDモジュールを試作した。外観写真を図5に, 内部構造のブロックを図6に示す。チューナブルDFBレー

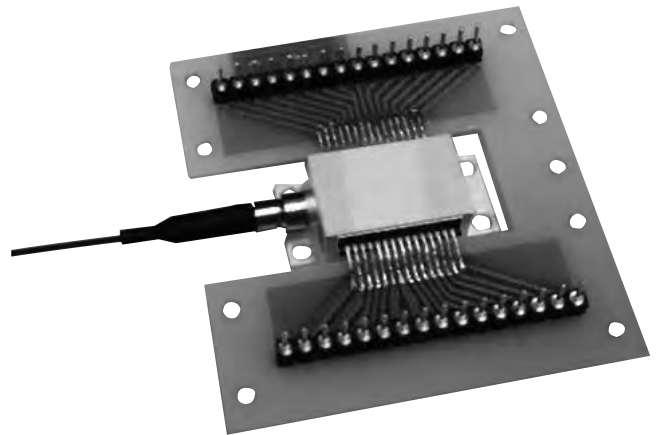
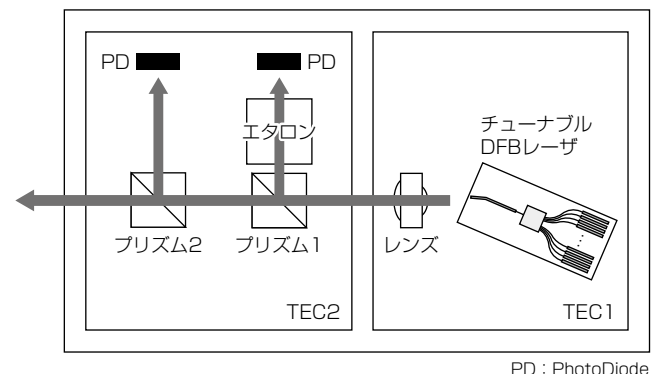


図5. LDモジュール



PD : PhotoDiode

図6. LDモジュールの内部構造のブロック図

ザチップはTEC1上に配置され、出力レーザ光を平行化するレンズも備えている。平行光化されたレーザ光はプリズムを介してLDモジュールの外部に取り出す光と波長モニタに用いる光に分岐される。波長モニタには波長変化を強度変化に変換する光フィルタとしてエタロンを用いて、チューナブルDFBレーザとは独立して温度制御するために別のTEC2上に配置した。

図7に試作したLDモジュールの波長可変幅の評価結果を示す。アレー化している16本のDFB-LDを順番に選択してLD駆動電流を供給し、チューナブルDFBレーザチップ温度を25～55℃に変更することで波長変更を行った。このLDモジュールの波長可変範囲は1,526.49～1,567.94nmであり、OIF-IC-TROSA-01.0(1,527.99～1,566.72nm)、OIF-400ZR-01.1(1,528.77～1,567.13nm)の規格を満足していることを確認した。

図8にLDモジュール消費電力のシミュレーション結果と評価結果を示す。チップ温度を25℃又は55℃になるようにTEC1を駆動しながらLDモジュール温度を-5～+75℃で変化させた場合のLDチップ消費電力とTECの消費電力の合計値を示している。シミュレーションではチップ温度25℃、LDモジュール温度75℃の条件で最大4.0Wになった。一方、測定結果は同条件で4.3Wであり、設計に近い値が得られるとともに、OIFのMicroITLAの消費電力仕様に適合可能な見込みを得た。

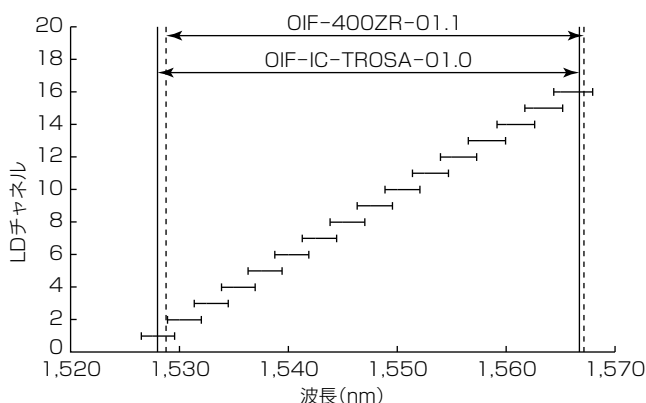


図7. LDモジュールの波長可変幅の評価結果

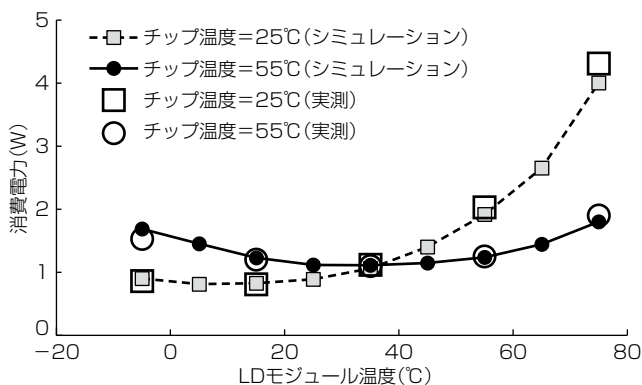


図8. LDモジュール消費電力のシミュレーション結果と評価結果

5. む す び

400Gデジタルコヒーレント通信用1.55μm帯チューナブルDFBレーザを開発した。波長可変方式として、波長の長期安定性、制御性に優れたDFB-LDアレー型を採用した。発振波長の異なる16本のDFB-LDアレー及び16×1 MMI光カプラ、SOAを集積することで光出力 ≥ 17 dBm、SMSR ≥ 45 dB、線幅 ≤ 300 kHz、波長範囲1,526.49～1,567.94nmを実現し、400Gbpsデジタルコヒーレント通信用途に好適な特性を得た。

今回開発した技術は、デジタルコヒーレント通信の大容量化に貢献するとともに、顧客の光トランシーバに最適なパッケージ設計に寄与することを期待する。

参 考 文 献

- (1) 鈴木扇太, ほか: 光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発, 電子情報通信学会誌, **95**, No.12, 1100～1116(2012)
- (2) Mardoyan, H., et al.: First 260-GBd Single-Carrier Coherent Transmission over 100km Distance Based on Novel Arbitrary Waveform Generator and Thin-Film Lithium Niobate I/Q Modulator, ECOC2022, Th3C.2 (2022)
- (3) OPTICAL INTERNETWORKING FORUM: MicroITLA-01.1 (2015)
<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-Micro-ITLA-01.1.pdf>
- (4) OPTICAL INTERNETWORKING FORUM: IC-TROSA-01.0 (2019)
<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-IC-TROSA-01.0.pdf>
- (5) OPTICAL INTERNETWORKING FORUM: 400ZR-01.0 (2020)
https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-01.0_reduced2.pdf

サーマルダイオード赤外線センサ “MeIDIR”とユーザーサポートツール

Thermal Diode Infrared Sensor "MeIDIR" and User Support Tools

相原育貴*
Yasuki Aihara
奥田聡志*
Satoshi Okuda
服部公春*
Masaharu Hattori

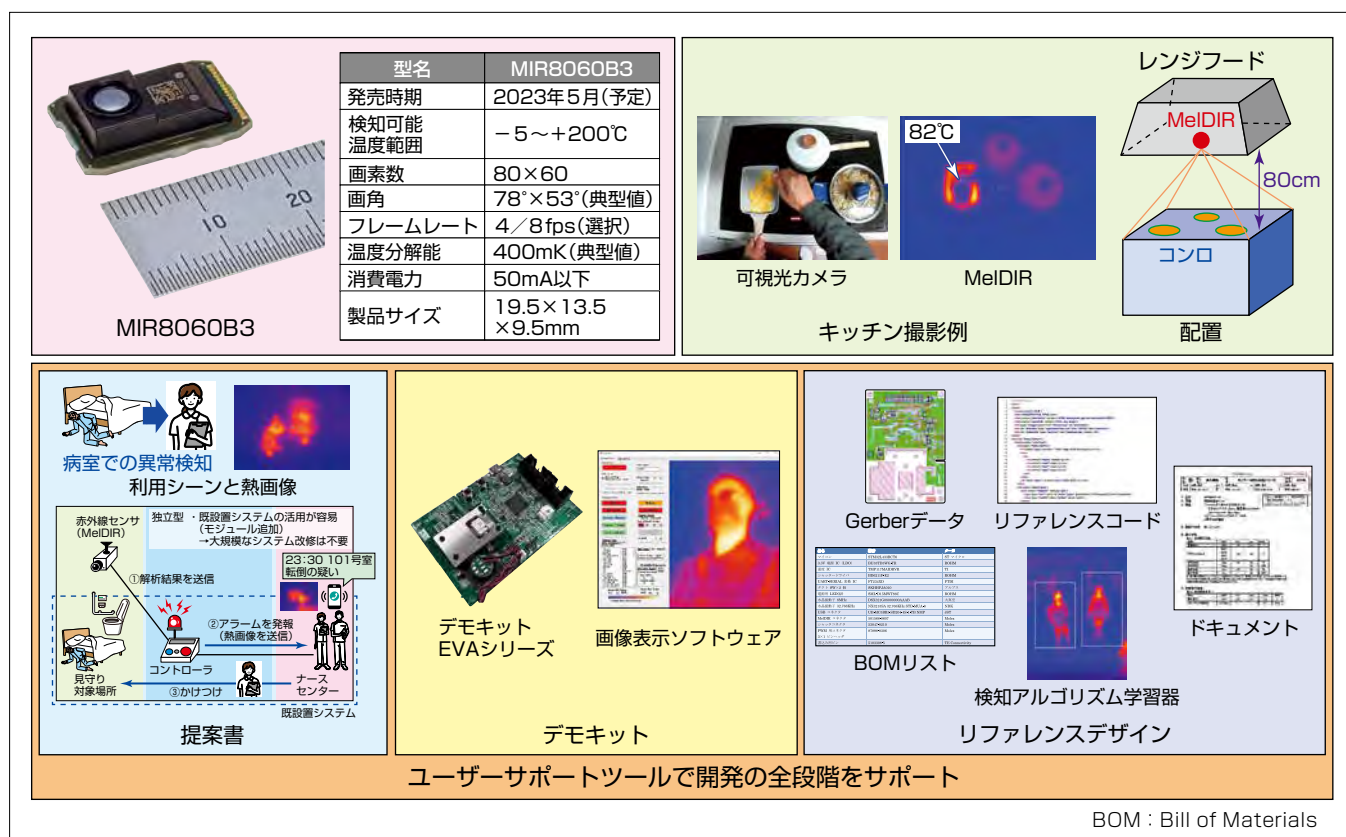
立岡靖晃*
Yasuaki Tatsuoaka
高橋貴紀*
Takanori Takahashi

要 旨

赤外線センサ“MeIDIR”は、三菱電機独自のサーマルダイオード方式を採用して2019年に発売した。高画素と高温分解能を特長として、エアコン、見守り、温度測定など様々な分野で採用されている。当初は生活圏内での人及び背景の温度情報把握を想定していたため、検知温度範囲を $-5 \sim +60^{\circ}\text{C}$ としていた。しかし、安全管理や快適な作業環境づくりを目的として、より高温になるキッチンや工場設備の温度分布などの把握に対するニーズが高いことが分かった。このため、広範囲な温度分布の測定が可能な赤外線センサ“MIR8060B3”を開発した。検知温度範囲を $-5 \sim +200^{\circ}\text{C}$ として、高温測定の市場に対応できるようにした。

また、これまでは顧客の量産開始に至るまでに要する期間が長いことが課題になっていたため、開発の全段階でサポートを行う“ユーザーサポートツール”を充実させた。コンセプト検討段階では提案書でMeIDIRの評価開始を促す。評価の段階ではデモキットと画像表示ソフトウェアを提供して評価期間の短縮に貢献する。製品企画、設計・試作段階ではリファレンスデザインを準備して設計情報を提供し、製品化までの期間短縮に貢献する。

これらの製品とサポートツールを用いて多種多様な分野への適用拡大を図り、安心・安全かつ健康で快適な社会の実現に貢献する。



サーマルダイオード赤外線センサMeIDIRとユーザーサポートツール

検知温度範囲を従来の $-5 \sim +60^{\circ}\text{C}$ から $-5 \sim +200^{\circ}\text{C}$ に拡張したサーマルダイオード赤外線センサMIR8060B3を2023年5月に発売開始予定である。キッチンや工場設備監視など、より高温の被写体を対象とした市場ニーズに対応する製品である。また充実したユーザーサポートツールを準備して開発の全段階でサポートを行うことで、顧客の製品化までの期間短縮に貢献する。

1. ま え が き

波長380nm(青)～780nm(赤)の可視光よりも波長の長い領域の光を赤外線と呼び、その中でも、8～14μmの赤外線を、長波長赤外又はLWIR(Long-Wavelength InfraRed)と呼んでいる。このLWIR域の光を検出するセンサを一般的に赤外線センサという。常温程度の熱源から放射される光はこのLWIR域にピークを持つことから、赤外線センサは人を検知する目的で広く用いられている。可視光によるカメラと異なり赤外線センサでは個人の特定が困難なことから、プライバシーを確保しながら人や物の検知ができるという特長がある。これは近年機運が高まっているウェルビーイングとの親和性が良いため、赤外線センサに対する注目度が向上する要因になっている。また、人だけでなく安全を目的とした工場設備の監視やキッチンでの温度管理など幅広い分野で活用されている。

本稿では、当社独自の技術を採用したサーマルダイオード赤外線センサMeIDIRの特長と、顧客が製品化するまでの一連のプロセスを手伝うユーザーサポートツールの開発について述べる。

2. サーマルダイオード赤外線センサ

2.1 赤外線の性質

絶対温度0 K以上の全ての物体は電磁波を放射する性質を持っており、黒体(全ての波長の放射を吸収するような物体)に対する波長当たりの放射量(放射発散度)は次の式で表される(プランクの放射則)。

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \left\{ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}^{-1} \left[\frac{W}{(\mu m \cdot m^2)} \right]$$

$$C_1 = 3.74 \times 10^8 \left[W \cdot \frac{\mu m^4}{m^2} \right]$$

$$C_2 = 1.44 \times 10^4 [\mu m \cdot K]$$

λ : 波長, T : 絶対温度[K], C_1, C_2 : 放射定数

図1は、LWIRが極低温から放射され300K付近の常温域でピークを迎えるのに対して、可視光は現実的な人間活動の温度領域ではほとんど放射されないことを意味する。

実際の物体の電磁波の放射量は物体表面状態に依存する放射率 ε によって異なる。放射率は吸収率に等しく、反射率の大きい物質や透過率の大きな物質では放射率は小さくなる。放射率は通常物体の表面状態によって異なり、例えば人体であれば0.98程度であるのに対して、研磨したアルミニウムだと0.04程度になる。また、電磁波は大気中で水蒸気や二酸化炭素によって吸収される性質があるが、波長

が8～14μmの領域は吸収が少なく、“大気の窓”と呼ばれ遠方の熱源の検出に特に優れた特性を持っている。さらに赤外線は可視光との波長の差が大きいため、その影響を受けにくく、波長が長いと可視光と比べて散乱しにくい性質を持っている。

このような性質から赤外線は簡単な熱源検知から、長距離の温度分布測定やリモートセンシングまで幅広い用途で利用されている。

2.2 赤外線センサ

赤外線センサは、赤外線を受光して電気信号に変換することで、非接触で物体の熱を検知／可視化する機能を持つ。図2に示すとおり、次の三つの特長がある。

(1) 熱源の温度情報を非接触で取得できるので、衛生面や安全面で優れている。

(2) 熱源のシルエットから人の動作や姿勢を判断できる。これは特にプライバシーの保護が必要な場面で有効で、カメラを設置できないトイレや浴室などでも活用できる。

(3) 暗闇や見通しの利かない煙の中でも熱源検知できるので、夜間の室内などでも安心して使用できる。

赤外線センサは検知方式から大きく量子型と熱型に分類される。量子型はCCD(Charge Coupled Device)などの一般的な可視光センサと同様に光電効果によって発生する電荷を検出する方式で、感度は高いが熱雑音の影響を低減するため冷却装置を必要として、利用分野が限定される。熱型は赤外線を検知部が吸収した結果生じる温度変化を電気信号に変換する方式で、量子型と比べて感度は低いですが冷却が不要で幅広い用途に活用されている。

一般的に広く使われている熱型赤外線センサは、従来、温度変化を検出する方式としては、焦電センサ方式、サーモパイル方式、ボロメータ方式の3方式が主流であった。

焦電センサは強誘電体の分極変化を検出する方式で、消費エネルギーが小さく製造コストも安いという利点がある

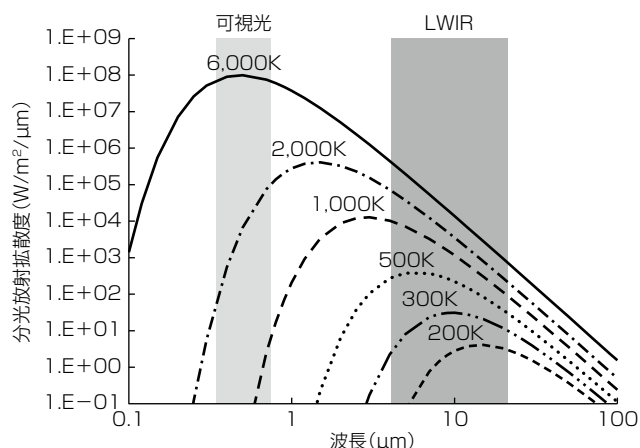


図1. 黒体からの電磁波の放射量と波長の関係



図2. 赤外線センサの特長

が、温度変化に対して起電力が発生するため静止した物体の検知に不向きであり、また製造方法から多画素化には不向きなため、簡単な人感センサなどに利用されている。

サーモパイルは異種金属を接合した熱電対を画素の熱検出に利用しているため、省電力で半導体製造技術を使って製造することが可能で多画素化も可能という特長を持っている。その一方で、単一熱電対の感度が低く、実用的な感度を得るために多数の熱電対を直列接続する必要があり、画素サイズが大きく多画素化を行うとセンサチップサイズや光学系が大きくなり急速に製造コストが高くなるため、比較的画素数の少ないセンサに利用されている。

ボロメータは抵抗の温度による抵抗値の変化を利用する方式で、半導体製造工程と相性が良く、抵抗体の熱電変換効率が優れているため感度が高いという利点があり、多画素化に向いている方式である。しかし、熱電変換の特性が非線形なため、受光面内の画素ごとの出力特性を一定にするための補正処理が必要で、補正演算や補正值を記憶するための半導体素子が必要になる。また補正值の取得のための調整・検査コストもありセンサ価格が高価になる。

2.3 サーマルダイオード方式

当社ではダイオードを熱検知部として独自のサーマルダイオード方式を開発した。サーマルダイオード方式は温度検知部に一般的なシリコン半導体製造工程で形成されるPN接合ダイオードを使用することを特徴としており、ボロメータと同様、半導体工程との相性が良く多画素化が容易な方式である。熱検知部のダイオードは順方向に定電流で駆動し、温度による電圧変動を検出することで熱電変換を行っている。

ダイオードの順方向電圧は温度に対して線形に変化する特性を持ち、その電圧特性は半導体工程の注入条件等で決まるため、ばらつきが少なく同一チップ内の画素が均一に製造できる。

3. サーマルダイオード赤外線センサMeiDIR

3.1 赤外線センサモジュール“MeiDIRシリーズ”

従来の赤外線センサ市場は低画素・低価格の熱検知用途の製品と、高画素・高価格の赤外線イメージング用途の赤外線カメラに二極化していた。簡単な赤外線イメージングが可能でかつ低価格な製品は以前から要求があったが、2章に述べたようなセンサ技術の制約で低価格なセンサを市場に提

供できなかった。

当社は独自のサーマルダイオード方式のセンサ素子を使用した、これまでになかった高画素で低価格な赤外線センサモジュールとしてMeiDIRを開発した。表1に製品ラインアップを示す。2019年にMIR8032B1を市場投入し、これまで国内を中心に高齢者施設での見守り分野や空調機器に搭載されるセンサとして、測定可能な温度範囲-5～+60℃の環境で使用されている。市場では、これらの分野以外にも、高温の対象物を取り扱う際の安全管理や快適な作業環境づくりを目的として、高温になるキッチンや工場設備の温度分布などの把握に対するニーズがあり、より広範囲な温度分布の測定が可能な赤外線センサが求められている。このため、2023年5月にMIR8060B3を発売開始予定である。これは信号処理とレンズの最適化によって上限+200℃までの高温や広範囲な温度分布の測定を可能にして、キッチンや工場設備監視等の市場ニーズにも対応できる製品である。

3.2 MeiDIRの高感度化技術

熱型赤外線センサは温度検知部の温度上昇を熱電変換するため、温度検知部と周辺環境との間の熱コンダクタンスが高いと検知感度が低下する。また、周辺画素との間の熱

表1. MeiDIRの製品ラインアップ

型名	MIR8060B3	MIR8060B1	MIR8032B1
発売時期	2023年5月(予定)	2021年7月	2019年11月
検知可能温度範囲	-5～+200(℃)	-5～+60(℃)	-5～+60(℃)
画素数	80×60	80×60	80×32
画角	78°×53° (典型値)	78°×53° (典型値)	78°×29° (典型値)
フレームレート	4/8 fps(選択)	4/8 fps(選択)	4 fps(固定)
温度分解能	400mK(典型値)	100mK(典型値)	100mK(典型値)
消費電力	50mA以下		
製品サイズ	19.5×13.5×9.5(mm)		
通信インタフェース	SPI(Serial Peripheral Interface)		

コンダクタンスが高いと画素で検出した熱が周辺画素に伝わるため分解能が低下する。そのためMelDIRでは画素であるダイオードと画素を形成する母材であるシリコン基板との間を中空化して、ダイオードを支持脚で保持する構造を形成し、この支持脚の中に配線を通すことでシリコン基板との間の熱コンダクタンスを下げつつ、構造維持と電気的な接続を実現している。この支持脚構造は薄膜SOI(Silicon On Insulator)基板を用いて温度検知部のダイオード構造と周辺の読み出し回路等をシリコン半導体製造工程で形成後ドライエッチングを行うことで形成しており、低コストで製造できる。図3にMelDIRの温度検知部の拡大写真を示す。25 μ mピッチの温度検知部が支持脚構造によって保持される中空構造が均一に形成できていることが確認できる。

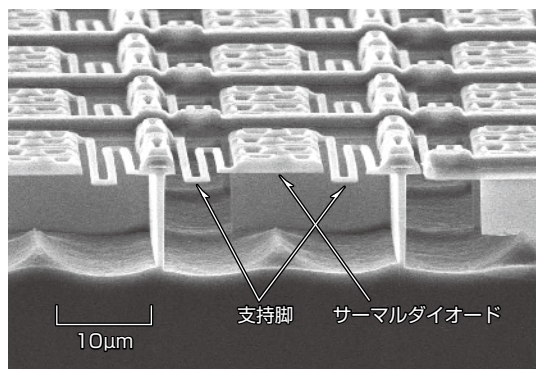


図3. MelDIRの温度検知部の拡大写真

4. ユーザーサポートツール

4.1 提案書

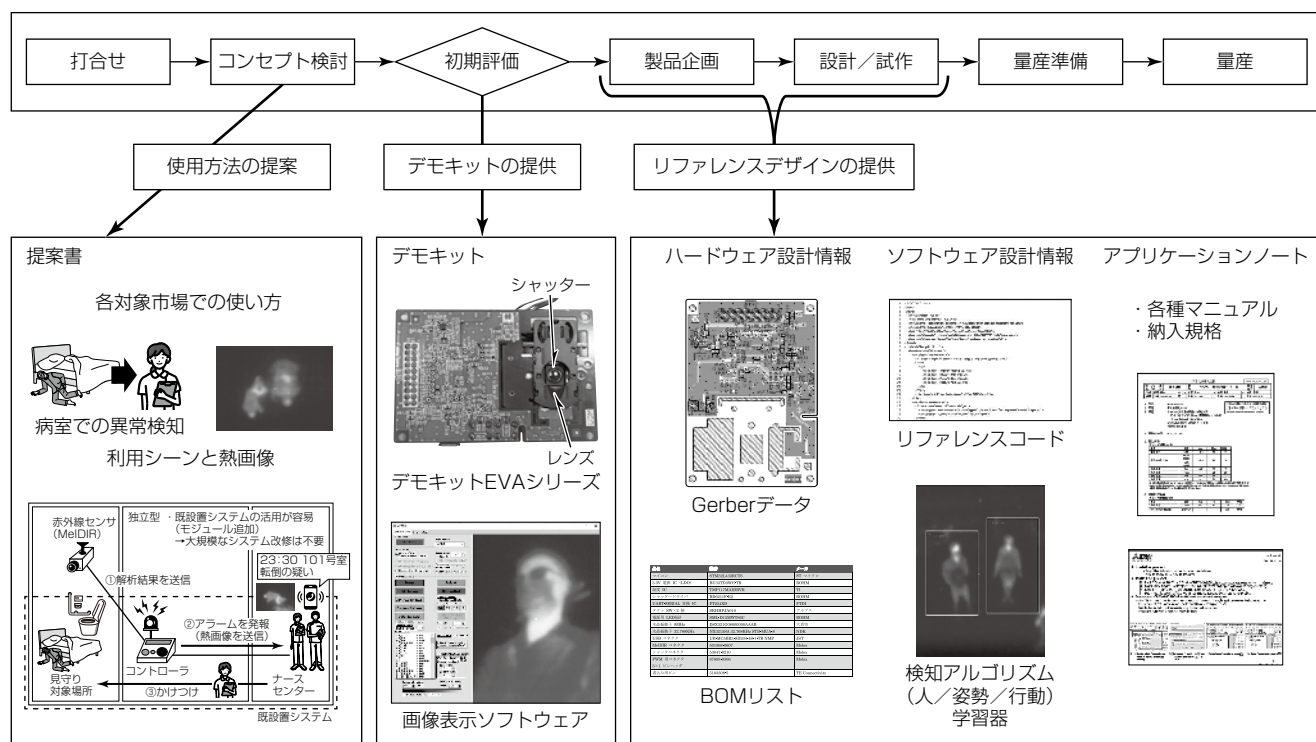
図4に一連のユーザーサポートツール群を示す。顧客の製品コンセプトを検討する段階をサポートするために提案書を準備している。MelDIRを使用するイメージを持ってもらうための豊富な熱画像例やMelDIR採用のメリットなどを示して、評価開始してもらうための足掛かりとなる内容になっている。

4.2 デモキット

顧客にMelDIRを評価してもらうために専用のデモキットを用いる。使い勝手をより向上させるためにMelDIR、シャッター、基板などを一体化させた。さらに基板面積を従来の約45%にまで小型化したデモキットEVAシリーズを2022年に開発して提供開始している。図5にデモキットの写真を示す。ケーブル接続及びドライバとビューアソフトウェアをインストールすることで容易に使用開始でき、評価の準備から完了までの期間短縮に貢献している。

4.3 リファレンスデザイン

顧客の製品開発段階に必要なハードウェア／ソフトウェア設計情報を提供するために、リファレンスデザインを開



製品開発の全段階でサポート
図4. MelDIRのユーザーサポートツール



図5. デモキットEVA-MIR8060B1-MC02V1-01

発した。リファレンスデザインはデモキットEVAシリーズの設計情報をまとめたものであり、BOMやGerberなどのハードウェア設計情報、リファレンスコードやディープラーニングによるオブジェクト検知などのソフトウェア設計情報、各種マニュアルなどのアプリケーションノートから成る。これらを活用してもらうことによって、製品開発期間の短縮に貢献する。

4.4 ディープラーニングを用いた熱源検知

4.4.1 熱源検知アルゴリズム

リファレンスデザインの中でディープラーニングを用いた熱源検知のアルゴリズムを提供している。YOLO (You Only Look Once)をベースとした検知アルゴリズムをMeIDIR用に最適化し、組み込み用の汎用MCU(Micro Controller Unit)をターゲットにエッジAIとして開発している点が特徴である。表2に熱源検知アルゴリズムとハードウェアの仕様を示す。

2022年11月の段階では、リビング内にいる人を検知する人検知アルゴリズムと、トイレでの姿勢を検知して異常かどうかを判断する姿勢検知アルゴリズムの二つを提供している。

表2. 熱源検知アルゴリズムとハードウェアの仕様

項目	仕様
MeIDIR型番	MIR8060B1-01
MCUボード型番	MCU-NUH723-MD**V*
リファレンスコード型番	SAPM-MD**V*
ターゲットMCU	STM32H723_G(Cortex-M7 1177 DMIPS@530MHz)
ディープラーニングアルゴリズム	MobileNetV2-YOLOv3-Nano
Rom size	<1 Mbyte
Ram size	<512Kbyte
Frame rate	7 fps(=142ms/frame)

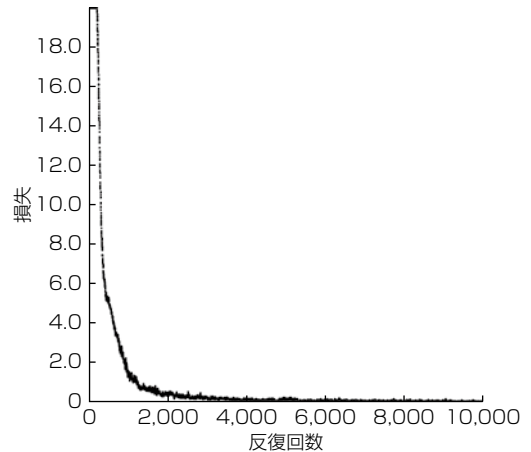


図6. 学習結果の例

4.4.2 モデル学習器

提供している検知アルゴリズムでは、顧客の使用条件によっては十分な検知精度を得られない場合がある。このため、それぞれの使用環境に合わせたAIモデルの作成を目的とした“MeIDIR向け学習器(MTT-V001)”を開発して提供している。さらに、グレースケール画像の抽出、アノテーション、AIモデル作成、マイコンへの組み込みの一連の作業手順をまとめたマニュアルの整備もしており、顧客自身で自社製品に最適化できる環境を整えている。

図6に学習結果の一例を示す。反復回数の増加に伴い損失が減少して計算が収束していることを示す。この例では、10,000回の学習で検知率の指標であるmAP(mean Average Precision)は80%以上を実現している。

5. む す び

MeIDIRの新製品として、検知温度範囲上限を従来の+60℃から+200℃に拡大したMIR8060B3を2023年5月に発売開始予定である。ニーズが大きかった工場設備の監視やキッチンでの温度管理などに対応できるようにする。また、顧客の評価及び製品開発を支援するユーザーサポートツールを充実化し、製品化までの時間短縮に貢献する。デモキットは使い勝手向上のためにMeIDIR、シャッター、基板などを一体化させ、さらに基板面積を従来の約45%にまで小型化したEVAシリーズを開発した。さらに、顧客の製品開発に必要なハードウェア／ソフトウェア設計情報を提供するためにリファレンスデザインを整備した。

これら製品群とサポートツールを用いて多種多様な分野への適用拡大を図り、安心・安全かつ健康で快適な社会の実現に貢献する。