



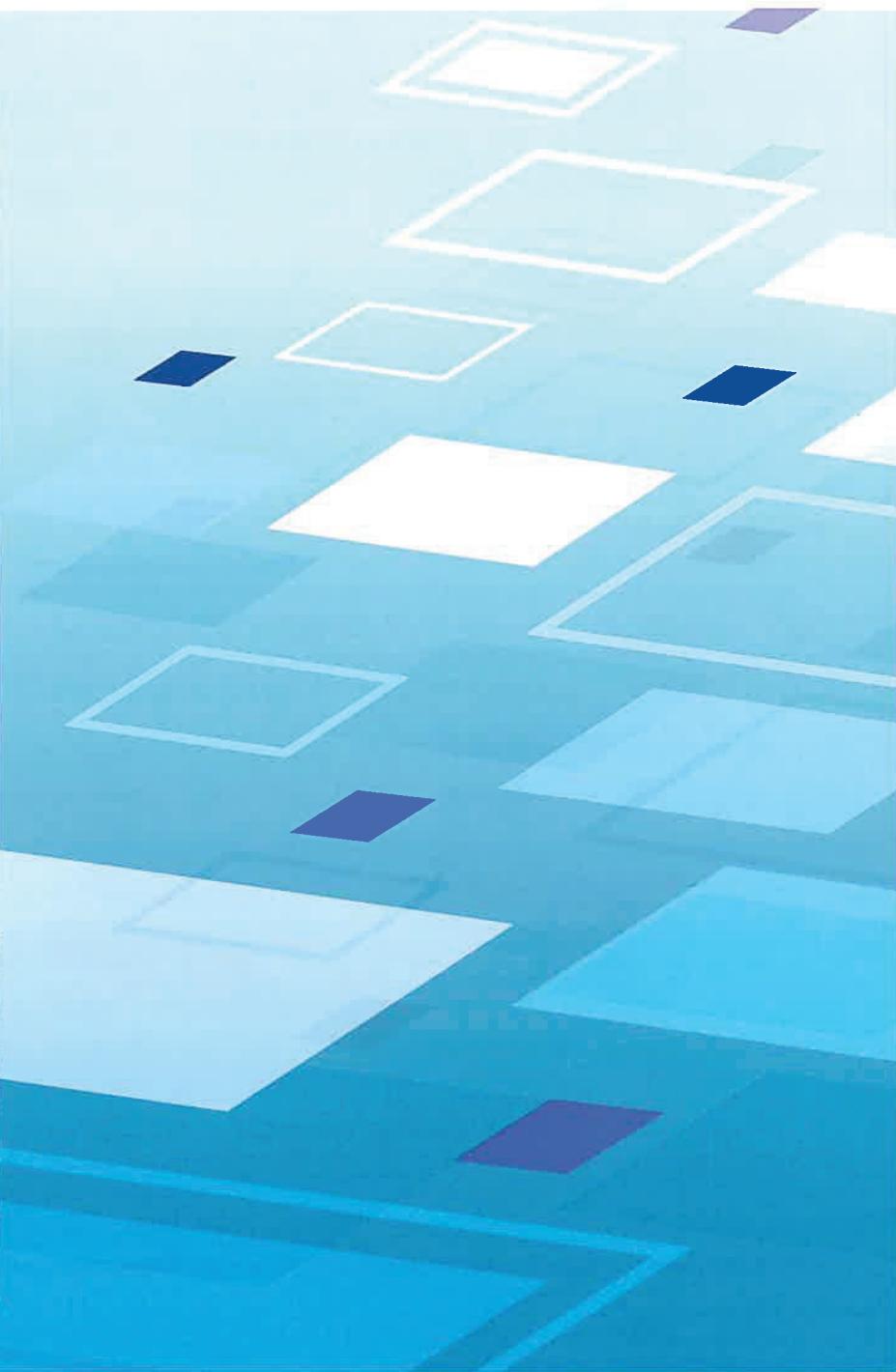
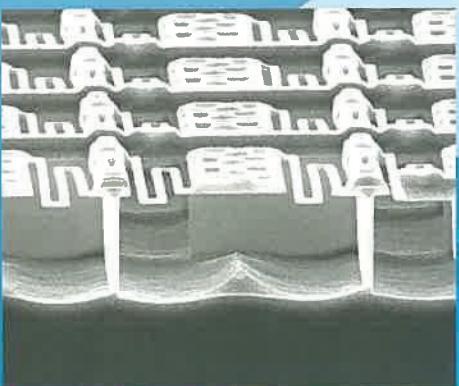
# 三菱電機技報

6

2021

Vol.95 No.6

## 高周波・光デバイス



表紙：高周波・光デバイス、赤外線センサ



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デジタルトランスフォーメーション(DX)が推進されており、情報通信技術とセンサ技術の重要性がますます高まっている。本号では、最新の情報通信用高周波・光デバイス、赤外線センサと関連技術について紹介する。

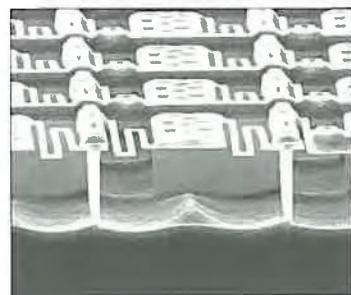
- ①100Gbpsの高速伝送が可能なCAN型パッケージ搭載EML(Electro-absorption Modulated Laser)である。第5世代移動通信(5G)のフロントホール等の伝送容量拡大に寄与する。
- ②マルチキャリア通信に対応したKu帯衛星通信地球局用GaN(窒化ガリウム)HEMT(High Electron Mobility Transistor)増幅器である。衛星通信地球局の小型化と伝送容量拡大に寄与する。
- ③赤外線センサ“MeDIR”的温度検知画素の拡大写真である。高画素化で、防犯、見守り、人数カウント、スマートビルなどへ用途を広げて社会に貢献していく。



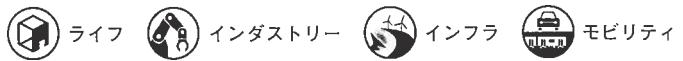
①



②



③



## 特 集 高周波・光デバイス

## High Frequency and Optical Devices

## 卷頭言

デジタルトランスフォーメーションでの  
高周波・光デバイスの貢献 ..... 4  
青藤 譲

## 卷頭論文

高周波・光デバイスの最新動向と将来展望 ..... 6  
竹見政義

Ku帯衛星通信地球局用  
マルチキャリア対応GaN HEMT ..... 11  
杉谷拓海・山崎貴嗣・吉岡貴章・三浦孝明

第5世代移動通信システム基地局向け  
小型GaNドハティ増幅器モジュール ..... 16  
坂田修一・嘉藤勝也・寺西絵里・小松崎優治・中山宏治

衛星搭載用Ka帯GaN HEMTの高効率化 ..... 21  
津波大介・柳生栄治・加茂宣卓・西口浩平・三木耕平

Combo-PON向け高出力10Gbps EML CAN ..... 26  
上上居 悠・柳築 崇・大和屋 武・白崎昭生・高木和久

第5世代移動通信システム基地局用50Gbps EML CAN ..... 31  
渡辺洋次郎・福島誠太・那須雅樹・中村誠希

第5世代移動通信システム基地局用100Gbps EML CAN ..... 35  
中野誠二・那須雅樹・奥田真也・藤原諒太

400Gbps光送信モジュールのための  
100G/λ EML集積化技術 ..... 40  
大畠伸夫・川本洋輔・村尾覚志・今井雄大・板本裕光

80×60画素サーマルダイオード  
赤外線センサ“MeDIRシリーズ” ..... 44  
高橋貴紀・前川倫宏

赤外線センサ“MeDIRシリーズ”を用いた熱画像処理技術 ..... 49  
三輪祥太郎

高加速試験による評価期間短縮と保護膜の解析技術向上 ..... 53  
井上晃一・佐々木 肇・日坂隆行

Contribution of High Frequency and Optical Devices in Digital Transformation  
Yuzuru Saito

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

Multi-carrier Support GaN High Electron Mobility Transistor for Ku-band Satellite Communication Earth Stations  
Takumi Sugitani, Takashi Yamasaki, Takaaki Yoshioka, Yoshiaki Miura

Compact GaN Doherty Power Amplifier Module for 5G Base-stations  
Shuichi Sakata, Katsuya Kato, Eri Teranishi, Yuji Komatsuzaki, Koji Yamana

High-efficiency Ka-band GaN High Electron Mobility Transistor for Space Applications  
Daisuke Tsunami, Eiji Yagyu, Yoshitaka Kamo, Kohei Nishiguchi, Kohei Miki

High Power 10Gbps EML CAN for Combo-PON  
Yu Uwadoi, Takashi Nagira, Takeshi Yamatoya, Akio Shirasaki, Kazuhisa Takagi

50Gbps EML CAN for 5G Base Stations  
Yojiro Watanabe, Hayata Fukushima, Masaki Nasu, Seiki Nakamura

100Gbps EML CAN for 5G Base Stations  
Seiji Nakano, Masaki Nasu, Shinya Okuda, Ryota Fujihara

100G/λ EML Integration Technique for 400Gbps Optical Transmitter Module  
Nobuo Ohata, Yusuke Kawamoto, Tadashi Murao, Yudai Imai, Hiromitsu Itamoto

80x60 Pixels Thermal Diode Infrared Sensor “MeDIR Series”  
Yoshinori Takahashi, Tomohiro Maegawa

Thermal Image Processing Technologies Using Infrared Sensor “MeDIR Series”  
Shotaro Miwa

Shortening of Evaluation Time by Highly Accelerated Stress Test and Improvement of Analysis Technique for Protection Coating  
Koichi Inoue, Hajime Sasaki, Takayuki Hisaka

## 一般論文

複写機用カラーA3サイズ  
密着型イメージセンサ“WFシリーズ” ..... 58  
白木 徹

Color A3-size Contact Image Sensor “WF Series” for Copier  
Toru Shiraki

くらしのエコテクノロジー ..... 62

Webサイト紹介(半導体・デバイスサイト) ..... 64

新型コロナウイルス感染症で亡くなられた方々に謹んでお悔やみを  
申し上げますとともに、罹患(りかん)された皆さまとご家族及び  
関係者の皆さまに心よりお見舞い申し上げます。

# 巻頭言

## デジタルトランスフォーメーションでの 高周波・光デバイスの貢献

Contribution of High Frequency and Optical Devices in  
Digital Transformation



齊藤 謙 *Yuzuru Saito*

常務執行役、半導体・デバイス事業本部長  
*Executive Officer, Group President, Semiconductor & Device*

### 1. 三菱電機創立100周年に当たって

三菱電機は2021年2月1日に創立100周年を迎えました。この歴史の中で、多くの半導体・電子デバイス製品を提供してきましたが、2003年のDRAM(Dynamic Random Access Memory)事業の終息やシステムLSIを中心とした事業の株ルネサス テクノロジ(当時)への移管等の変遷を経て、現在は、パワー半導体や高周波・光デバイス、及びTFT(Thin Film Transistor)液晶モジュール(2022年をめどに生産を終了し、事業終息予定)を事業展開しています。

本稿では、デジタルトランスフォーメーション(DX)での重要なキーデバイスである高周波・光デバイスに焦点を当て、その果たすべき役割について述べたいと思います。

### 2. 情報通信技術の重要性

2020年の新型コロナウイルス感染症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められています。具体的には、人との物理的接触を低減しつつ経済活動や生活の活性化を図るために、テレワーク、オンライン授業、オンライン診療等の充実化・高度化が推進されています。総務省の発表では<sup>(1)</sup>、2020年11月時点での固定系ブロードバンドサービス契約者のダウンロードトラフィックは前年同月比56.7%増(総計約19.8Tbps)、アップロードトラフィックは同51.1%増(総計約2.4Tbps)と、感染の拡大防止のための在宅時間の増大と連動して大幅に増加していることが示されています。経済産業省は、以前から、企業の競争力維持・強化のためにDXを推進してきましたが<sup>(2)</sup>、今回の感染症拡大に伴い、DXの加速がより一層強く必要とされています。

また、2020年10月26日の首相所信表明演説では、日本

政府として初めて、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、“カーボンニュートラル”的実現を目指すことが宣言されました。その中で、デジタル化によって効率的、効果的にグリーン化を進めることが示されています。これを受け、経済産業省が関係省庁と連携して、“2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略”を策定・発表しています。その中の半導体・情報通信産業の成長戦略では、DX推進に伴うグリーンなデータセンターの国内立地推進、5Gなど次世代情報通信インフラの整備が今後の取組みとして掲げられています。また同時に、データセンター、情報通信インフラの省エネルギー化・高性能化・再生可能エネルギー化を推進する必要があります、2030年までに全ての新設データセンターの30%省エネルギー化等への取組みが織り込まれています。2040年には半導体・情報通信産業のカーボンニュートラル実現を目指す構想が示されるなど、情報通信を支える技術の重要性は、今後もますます高まっていきます。

### 3. 高周波光デバイス製作所の歴史

当社の半導体・デバイス事業本部に属する高周波光デバイス製作所では、DXの推進に不可欠な情報通信インフラやデータセンター等を支える高周波デバイスと光デバイスを主力製品として開発・生産しています。製作所での情報通信に関するデバイスの歴史は長く、1962年にラジオ用Si(シリコン)トランジスタの生産を開始しました。以降、化合物半導体デバイスの開発に力を入れて、高周波デバイス分野では、衛星放送受信機用の低雑音GaAs(ガリウムヒ素)HEMT(High Electron Mobility Transistor)(1987年)、海外携帯電話の一時代を担ったGSM(Global System for Mobile communications)方式対応のGaAs HBT(Hetero-

junction Bipolar Transistor)増幅器(1999年)を量産化しました。また、デジタル携帯電話PDC(Personal Digital Cellular)対応の小型・高効率HEMT PA(Power Amplifier)(2002年)では国内トップシェアになり、現在ではGaN(窒化ガリウム)材料を用いたデバイスも加わって、レーダや無線通信向けに最先端デバイスを提供しています。GaNは、SiやGaAsと比較して材料物性としての飽和電子速度が速く、高い絶縁破壊電界強度を持っているため、今後更に高速・高出力なレーダや無線通信への適用を拡大していきます。光デバイス分野では、1967年に世界で初めて可視光半導体レーザの室温パルス発振に成功し、その後、放射ビームの単峰化や結晶材料中の酸素濃度低減による長寿命化等、実用化の基礎になる研究を重ねてきました。また、発光層や信号変調層を作製する結晶成長技術として、旧来の液相成長法に代えて気相成長法をいち早く導入して数原子層の量子井戸を持つ多重量子井戸構造を実現し、デバイスの発光効率や変調速度を格段に向上させました。これらの研究成果は情報通信用途を始めとした各種光デバイス製品へと結実し、2004年度に“DVD記録用赤色高出力レーザの開発と生産”で大河内記念生産賞を、2015年度には“光通信用DFB(Distributed FeedBack)レーザの開発と生産技術の確立”で大河内記念生産賞を受賞しました。現在では5G移動通信システム用途やクラウドサービス、データセンター向けの光デバイス分野でも世界トップクラスの数量を供給しています。さらに、長年培った情報通信用デバイスの開発・生産技術を糧に、観測技術衛星に搭載したセンサの技術を活用して高画素化・高温度分解能化を実現し、詳細な熱画像を取得できる当社独自のサーマルダイオード赤外線センサ“MelDIRシリーズ”を新たに製品化しました。この方式は温度変化の指標になるダイオードの順方向電圧が温度に対して線形に変化するため、従来方式より容易・低コストでの感度補正が可能という特長を持っています。このデバイスは、防犯機器や空調機器、人数カウントソリューション、スマートビル等の幅広い用途で、高精度での人・物の識別や行動・状態の把握を可能にします。

このように高周波光デバイス製作所では、半導体レーザの多重量子井戸構造に代表されるように、高品質な薄膜結晶を成長させて再現性良く加工する技術など、化合物半導体デバイスの生産技術をコアコンピタンスとして、最先端デバイスを製品化してきました。

#### 4. 高周波・光デバイスの果たすべき役割

DXを加速するために、情報通信インフラとデータセンターの今後を見据えて、GaN増幅器と半導体レーザなどの高速化・高効率化と低消費電力化に取り組んでいます。

2020年6月に総務省から示された「Beyond 5G推進戦略

(概要)」<sup>(3)</sup>では、5Gと比べて10倍のアクセス通信速度(コア通信速度は現在の100倍)、1/10の低遅延、10倍の多数同時接続数を実現しつつ同時に現在の1/100の低消費電力化が求められています。Beyond 5Gの移動通信基地局では、高速性と多数同時接続性を両立させる要請から、アレーランテナ上に複数の増幅器モジュールが搭載されて多くのユーザーに電波のビームが照射されます。アレーランテナ上では搭載モジュールのサイズや放熱性が制限されるため、当社では小型・高効率・高速動作に優れるGaN増幅器に広帯域化回路を適用したモジュールでこれに対応し、情報通信インフラの省エネルギー化に寄与します。

一方、省エネルギー対策がなされないと仮定すると、IP(Internet Protocol)トラフィック増大によって、日本のIT機器の電力消費量だけで、2030年には2018年時点の全国の総使用電力量の1.5倍を超えると予測されています<sup>(4)(5)</sup>。

当社ではIPトラフィックの増大に対応して、光ファイバ通信用の半導体レーザとして高速動作が可能な省電力型のDFB-LD(Laser Diode)やEML(Electro-absorption Modulated Laser)等を提供してきました。今後、更にIPトラフィックの増大が進むとデータ信号が極めて高速になるため、IT機器の周辺や機器内の光化されていない短距離伝送路、例えばプロセッサやメモリ間の電気信号伝送路等での損失や帯域不足が著しくなり、これを補償するための電力量が急激に増大します。この抑制には、プロセッサやメモリの直近で電気から光に信号を変換してから伝送することが重要です。当社では、この要請に向けて、高密度実装性と低消費電力動作を追求した超高速EML等の次世代光デバイスの開発と製品化に注力し、情報通信インフラやデータセンターの省エネルギー化を実現します。

今後も化合物半導体デバイスの生産技術をコアコンピタンスとして時代に即応した最先端のデバイスを提供し続けることで、社会課題の解決に取り組んでいきます。

この特集号では、安全快適な新たな生活様式へのシフトや企業活動の革新に貢献する当社の高周波・光デバイスと、その他関連技術の最新動向をご紹介します。

#### ■ 参考文献

- (1) 総務省：我が国インターネットにおけるトラヒックの集計結果(2020年11月分)，2 (2021)  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000731585.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000731585.pdf)
- (2) 経済産業省：デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン (2018)  
<https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf>
- (3) 総務省：Beyond 5G推進戦略(概要)，3 (2020)  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000702111.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000702111.pdf)
- (4) 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.1) (2019)  
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf>
- (5) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書2020【第214-1-1】部門別電力最終消費の推移 (2020)  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-1-4.html>

## 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

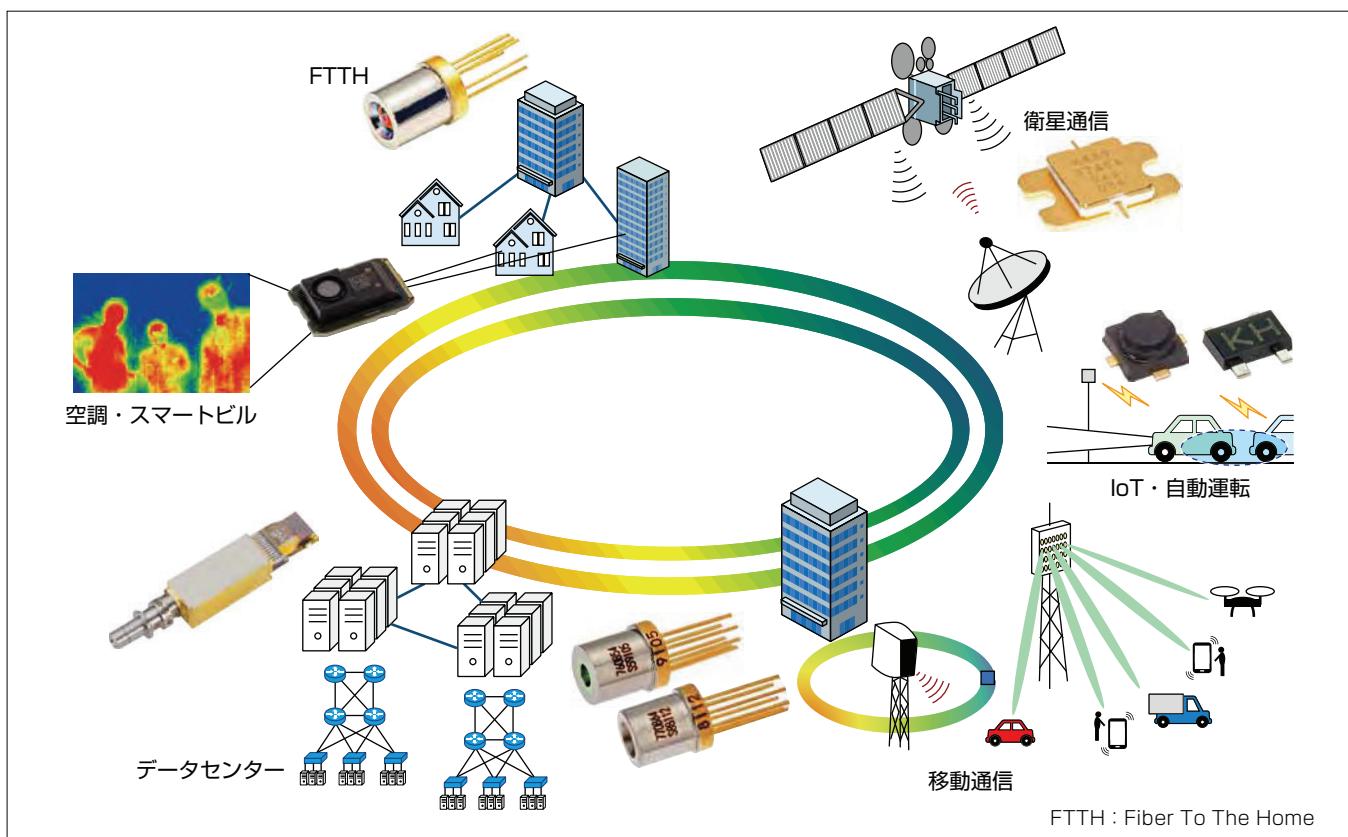


竹見政義\*  
Masayoshi Takemi

### 要旨

デジタルトランスフォーメーション(DX)は、人との物理的接触を低減した経済活動や新生活様式へのシフトにも寄与するため、新型コロナウイルス感染症抑制の観点でも重要性が高まっている。DXの推進には、第5世代移動通信システム(5G)や、これをインフラとしたIoT(Internet of Things)、さらには大量のデータを伝送できる光通信ネットワークが必要である。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ている。Massive MIMO(Multi Input Multi Output)アンテナを用いた基地局が設置され、多数のアンテナから位相や振幅を制御した電波を放射することで、多くのユーザーに各々電波のビームを照射し、同時に多接続と高速大容量通信を両立させる。三菱電機はこの用途向けに小型高効率で発熱が少ないGaN(窒化

ガリウム)増幅器を開発・製品化している。また、通信インフラの基幹部を担う光通信ネットワークは、5Gに加えて、データセンターの増設・大規模化、クラウドサービスやインターネットの普及等による通信トラフィック総量の増大に応えるためネットワークの全階層で高速化・伝送容量の増強が進められている。当社は、分布帰還型レーザ(Distributed FeedBack Laser Diode : DFB-LD)では25Gbps、電界吸収型変調器集積レーザ(Electro-absorption Modulated Laser : EML)では100Gbpsまでの動作を実現している。さらに、当社は、低コスト化・高画素化が可能かつ高性能な小型・低価格赤外線センサモジュール“MeIDIR”を製品化しておりIoTへの適用が期待される。



### 当社の情報通信用高周波・光デバイスの適用分野

当社の情報通信用高周波・光デバイスは、無線通信、光通信、IoT・自動運転、空調・スマートビル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ことを通じて日本企業の競争優位を目指し、カーボンニュートラルにも貢献するDXが推進されている<sup>(1)(2)(3)</sup>。DXは人との物理的接触を低減した経済活動や新たな生活様式へのシフトにも寄与するため、新型コロナウイルス感染症抑制の視点でも重要性が高まっている。DXの実現に必要な超高速、超低遅延、超高信頼及び多数同時接続性を特長とする5Gが始まり、これをインフラとしたIoTや自動運転等の実用化も進んでいる。また、これらを支える通信インフラの基幹部を担う光通信ネットワークは、5Gの運用開始に加えて、データセンターの増設・大規模化、クラウドサービスやインターネットの普及等による通信トラフィック総量の増大に応えるためにネットワークの全階層で高速化・伝送容量の増強が進められている。

本稿では、情報通信の進展を支える高周波・光デバイスについて、その最新動向と将来展望について述べる。

## 2. 高周波デバイス

### 2.1 5GからBeyond5G/6G移動通信

移動通信では5Gの本格的な運用が始まると、従来の第4世代移動通信システム(4G)では不可能であった様々なサービスが始まろうとしている。5Gでは①超高速eMBB(enhanced Mobile Broad Band), ②超低遅延、超高信頼URLLC(Ultra-Reliable and Low Latency Communications), ③多数同時接続mMTC(massive Machine-Type Communications)を特長としている(図1)。

10~20Gbpsの高速通信によって、8Kビデオやテレワーク、ゲームを行えるとともに、クラウド上のAIを駆使したXR(Extended Reality)による仮想空間と現実世界の融

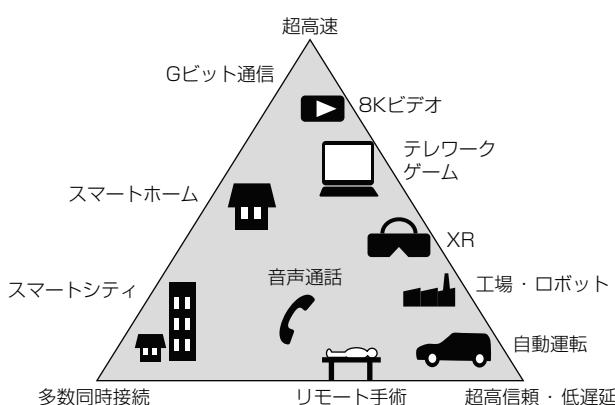


図1. 5Gの特長と応用

合が可能になりつつある。また、高信頼で遅延のない制御によってロボットや工場のコントロール、自動運転、リモート手術といったリアルタイムでの応答が可能になり、ミッションクリティカルと呼ばれる社会的に重要な情報システムに展開されつつある。さらに1平方km当たり100万台もの多数のデバイスを接続することによって、多様なセンサからのデータを活用でき、スマートシティの実現に寄与している。

5Gではこのような特性を実現するためにMassive MIMOアンテナを用いた基地局が設置されており、多数のアンテナから位相や振幅を制御した電波を放射することによって、多くのユーザーに各々電波ビームを照射し、同時に多接続と高速大容量通信を両立させている(図2)。GaN増幅器は小型高効率で排熱が少ないとことから、これらのアンテナに多用されている。

化合物半導体であるGaNやGaAs(ガリウムヒ素)はSi(シリコン)よりもバンドギャップの大きい材料であり、絶縁破壊電圧が高くて高電圧で動作させることが可能で、小さいデバイスサイズで大電力を出力できる特長がある。そのため出力電力当たりの寄生容量や抵抗を小さくでき、効率が高く、より広帯域な増幅器を実現できる。中でもバンドギャップが大きいGaNは小型化と省エネルギーが求められる5G基地局に最適であり、高度通信社会を支えるインフラに貢献している。

5Gでは通信容量を増やすために従来の0.9~2GHz帯に加えて3~5GHzの帯域を新たに使うとともに、28~40GHzといったミリ波帯まで用いている。化合物半導体は電子の移動度が高く、より高い周波数での動作性能が優れているため、今後伸びていくものと考えられる。

5G以降に計画されているBeyond5G/6Gの通信では40~100GHzのミリ波帯の活用に加えて、300GHzといったTHz帯の利用も検討されており、桁違いに高速なデバイスが求められている。また、衛星通信や飛行船、ドローン等の活

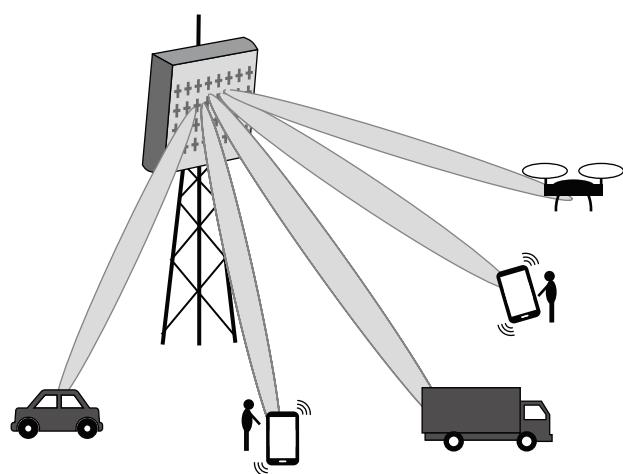


図2. Massive MIMOアンテナ基地局

用によって、地球上のどこでも高度な通信サービスが受けられるシステム構築を目指しており、多種多様な通信手段の充実化が図られる。化合物半導体の高度化によって、こういった需要に応えていく。

## 2.2 IoT・自動運転

物と物との通信システムとして、IoTや、車の通信を用いた自動運転が実用化しつつある。これらを実現するため、①膨大な数のセンサや車をネットワークにつなげる多数接続技術、②リアルタイムな制御を可能にする低遅延技術といった5Gと共に開発に加えて、③多様な情報を取得するセンサ技術や④V2X(Vehicle to X)と呼ばれる車と全ての物との通信技術、⑤膨大なデータを短時間に処理するAIや量子コンピュータの開発が行われている。

化合物半導体は車や障害物の位置や速度を検知する車載レーダーに用いられている。さらに、渋滞を避けたり交差点の情報を得たりすることによって安全でスムーズな運転を行うため、車車間や路車間通信によって道路や交差点の状況や周囲の車の動きに関する情報を把握してより高度な制御を行うV2X通信技術が開発されている。これらの通信用デバイスには高周波性能に優れるGaAsやGaNデバイスが用いられている。IoTに用いるセンサの通信機器にはバッテリー駆動可能な小電力デバイスが求められるために安価なSi系デバイスが多用されるが、カバーエリアが広く高出力が要求される基地局には低消費電力なGaNデバイスが活用されている。また、大規模コンピュータや量子コンピュータのインターフェースにはマイクロ波やミリ波等の電磁波が検討されており、今後化合物半導体の活用が期待される。

このように、半導体はユースケースに応じて最適なデバイス・材料が使われるため、化合物半導体の特長を生かした製品群によってICT(Information and Communication Technology)社会の構築に貢献していく。

## 3. 光通信用デバイス

### 3.1 市場・技術動向

通信インフラの基幹部を担う光通信ネットワーク(図3)では、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の普及に伴うデータセンターの増設・大規模化や、5G移動通信の導入、インターネット接続デバイス数の増加などによって、通信トラフィック総量の着実な増大が見込まれている。このような通信需要の拡大に対応して、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

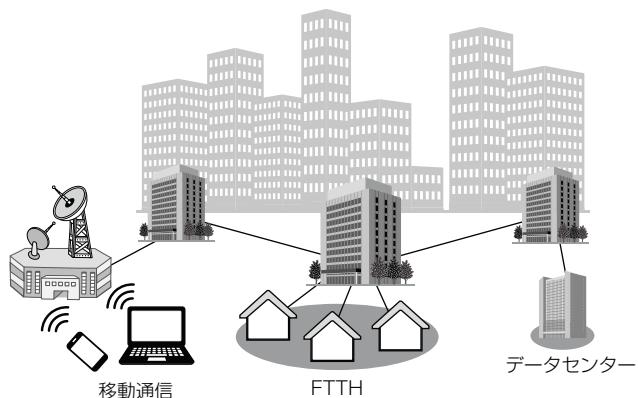


図3. 光通信ネットワーク

ど全てのネットワーク階層で、光ファイバ伝送容量の増強が進められている。具体的には、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(Mobile Fronthaul: MFH)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(Mobile Backhaul: MBH)から、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、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、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。

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でも、最高10Gbpsを実現するXG-PON(10 Gigabit capable-PON(Passive Optical Network))やXGS-PON(10 Gigabit capable Symmetric PON)の導入が本格化しており、高速化が進んでいく。さらに、光アクセスシステムの更なる高速化を目指して、25Gbps/50GbpsベースのPONシステムの仕様を標準化したIEEE 802.3ca-2020が採択され、実用化開発のフェーズに入った。PONシステムでは物性や伝送距離があらかじめ定まった敷設済みのシングルモードファイバ網で端局装置を置き換えることによってシステム性能を満たす必要があるが、25Gbps/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移動通信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、従来光ファイバ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。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、DFB-LD対応では25Gbps、EML対応では100Gbpsまで動作が確認されている。ただし、100Gbpsでは、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PAM-4(Pulse Amplitude Modulation -4)変調が採用されている。

データセンターや波長多重(Wavelength Division Multiplexing: WDM)伝送システム等、多くの光トランシーバを一括して使用するシステムでは、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機器内でも光化されていない電気信号伝送路の損失や帯域不足が著しくなり、これを補償するための電力量が急激に増大する。この抑制には、伝送路の光化が重要であり、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、シリコンプラットフォーム上に光導波路、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、シリコンフォトニ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。

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、同一波長を二つに分けて90度の位相差を設け、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(Quadrature Amplitude Modulation: QAM)と呼ばれる変調方式に代表される、デジタルコヒーレント通信方式が広く用いられるようになった。

### 3.2 今後の展望

化合物半導体は、シリコンフォトニ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競う。シリコンは材料自体や単位面積当たりの加工費が安価にできる利点はあるが、本質的に光との相互作用が弱い材料なので、変調器チップの大型化が避けられず、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特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、デジタルコヒーレント通信用途を含む今後の更なる高速化にも最適な選択肢であると考えられる。今後、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。また、データセンター用通信設備に代表されるように、今後は一つの装置に多数の光デバイスが収容されるので、個々のデバイスに要求される長期信頼性のレベルが桁違いに高くなることが想定される。当社の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製品にも展開することで、将来の超高信頼度の要求にも対応していく。

## 4. 赤外線センサ

### 4.1 市場・技術動向

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、中でも8～14μmの赤外線は、遠赤外線又はLWIR(Long-Wavelength InfraRed)と呼ばれている。遠赤外線を測定して画像化したイメージの特長としては、被写体温度の判別が可能であることはもちろん、暗視が可能であること、可視波長の外乱光の影響を受けにくいため、煙、霧などの波長より小さい微粒子による散乱の影響を受けにくいことが挙げられる。

従来、赤外線センサは高画素・高感度の赤外線カメラ用途と、低画素・低分解能の熱検知用途に大きく分かれていた。赤外線カメラにはボロメータ方式のセンサが、低画素センサには焦電センサやサーモパイル方式のセンサが採用されている。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、赤外線カメラに使用されていた高画素センサの低画素化や、従来熱検知に使用されていたセンサの高画素化によって簡単な画像解析を伴う、防犯、見守り、スマートビル、人数カウントといった用途が広がり、これまで大きくなかった市場が急成長を示している。

### 4.2 赤外線センサMeDIRの特長と応用

当社では1980年代から赤外線センサの技術開発を行い、独自方式のサーマルダイオード赤外線センサ技術を開発し、高画素、高分解能な赤外線センサに適用してきた。サーマルダイオード赤外線センサ技術は、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かつ高性能という特長がある。このような特長を生かし、2019年一般民生用に小型・低価格赤外線センサモジュール“MeDIRシリーズ”的最初の機種として“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)を実現している。当社ルームエアコン“霧ヶ峰”的“ムープアイmirA.I.+(ミライプラス)”にこのセンサを搭載することで、部屋の状態を熱画像で確認し、気流の調整を行って快適性向上に貢献しており、その他、体温検知等の製品にも搭載されている。

MeDIRシリーズの次の機種として、“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”というユーザーの要望に応えて、MIR8032B1と同じセンササイズと温度

分解能で、かつMIR8032B1の1.8倍の画角( $78^\circ \times 53^\circ$ )と1.9倍の画素数( $80 \times 60$ )を実現した“MIR8060B1”を2021年7月に発売することを発表した。画角だけではなくフレーム更新周期を従来の4fps(frames per second)に加えて、8fpsを追加し、“より速く動く熱源を精度良く検出したい”という要望にも対応した(図4)。

#### 4.2.1 MelDIRの特長

MelDIR用の赤外線センサ素子に採用されているサーマルダイオード赤外線センサは、赤外線検知部をシリコン半導体製造工程でPNダイオード形成するためには均質性で高画素化が可能になる。温度検知部は半導体プロセスでPNダイオードを形成後MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術によってダイオードが支持脚に保持される中空構造を形成し、その後、検知部周囲が真空になるように封止することで高感度を実現している。また、ダイオードと同一シリコン基板上に高性能アンプを形成することで高い温度分解能を実現している。

さらに、MelDIRは従来セラミックパッケージによって実現していた真空封止構造を、ウェーハ一括形成によって真空封止を行うチップスケールパッケージ技術を開発し、小型化を実現するとともに生産性を飛躍的に向上させた(図5)。

#### 4.2.2 MelDIRの応用例

図6は防犯応用を想定した暗い室内での侵入検知の事例である。この事例では可視カメラが侵入者を捉えられない状況でも赤外線センサは侵入者の行動をはっきりと捉えていることが分かる。

図7は病室内見守り応用の事例である。ベッドから降りようとしている人が転倒する状況を赤外画像でもはっきりと捉えており、室内の照明が落ちた状態でも検知性能の低



図4. MelDIRシリーズの外観と主要諸元

形名	MIR8060B1	MIR8032B1
モジュールサイズ	19.5×13.5×9.5(mm)	
画素数	80×60	80×32
画角	$78^\circ \times 53^\circ$	$78^\circ \times 29^\circ$
フレームレート	4/8fps	4fps
温度分解能(NETD)	100mK	100mK

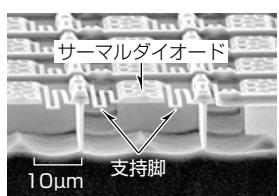


図5. 真空封止構造とチップスケールパッケージ

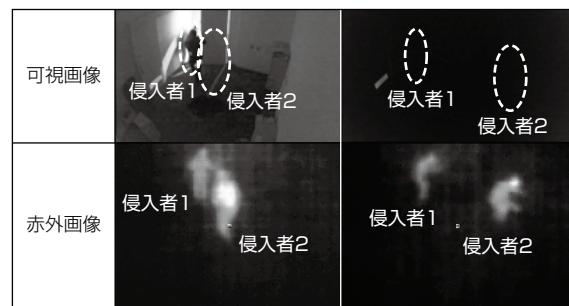


図6. 防犯応用の侵入検知イメージ

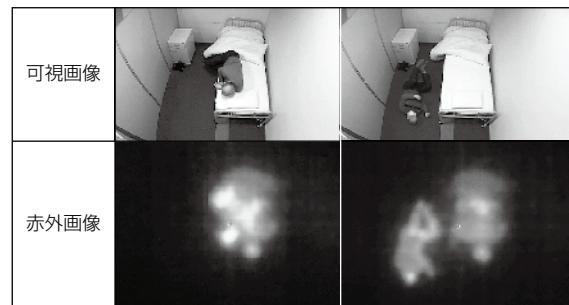


図7. 病室内見守り応用の転倒検知イメージ

下がないという特長によって、対象人物のプライバシーを考慮しつつ見守りを行うことが可能である。

このように、MelDIRは小型・高分解能で比較的安価な赤外線センサを提供することで、空調、防犯、見守り、スマートビル、人数カウント以外にも幅広い分野で応用が進むと考えられる。

## 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、日本企業の競争優位に貢献するDXの推進を支え、新型コロナウイルス感染症抑制の視点からも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、先進的な高周波・光デバイスの提供を通じて、ニューノーマルへの適合を支援して活力とゆとりある社会の実現を目指す。

## 参考文献

- (1) 経済産業省：デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン(DX推進ガイドライン)Ver.1.0 (2018)  
<https://www.meti.go.jp/press/2018/12/20181212004/20181212004-1.pdf>
- (2) 首相官邸：第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説 (2020)  
[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)
- (3) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2020)  
<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf>

# Ku帯衛星通信地球局用 マルチキャリア対応GaN HEMT

Multi-carrier Support GaN High Electron Mobility Transistor  
for Ku-band Satellite Communication Earth Stations

杉谷拓海\*

Takumi Sugitani

三浦孝明†

Yoshiaki Miura

山崎貴嗣\*

Takashi Yamasaki

吉岡貴章\*

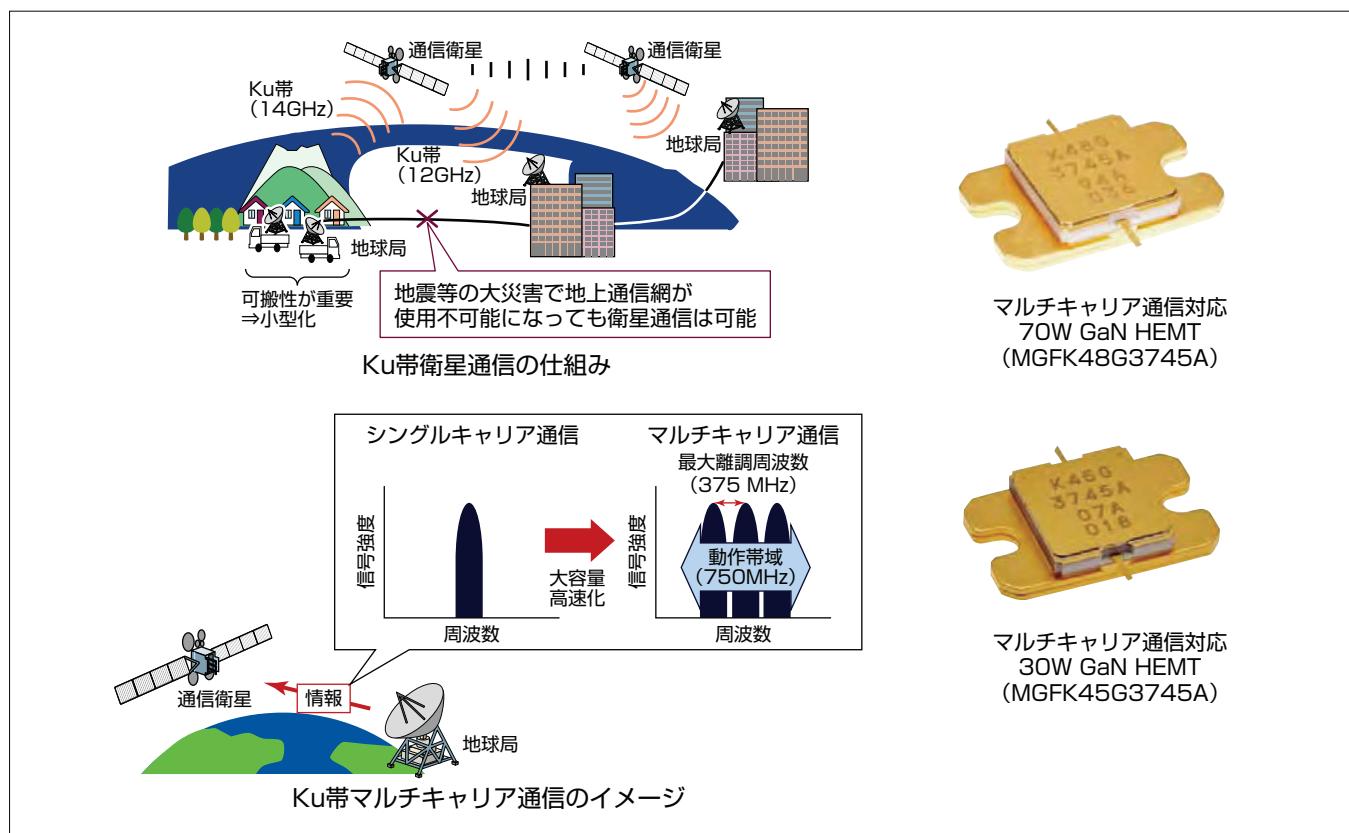
Takaaki Yoshioka

## 要旨

近年、GaN(窒化ガリウム)HEMT(High Electron Mobility Transistor)増幅器の登場で、衛星通信用送信機の半導体化が進んでいる。これまで三菱電機では、高速通信が可能なKu帯衛星通信需要の拡大に対応して、高出力、高効率動作、小型化に有利なGaNを用いたKu帯衛星通信地球局用GaN HEMTの製品化を進めてきた。現在の衛星通信地球局用途では更なる情報伝送量の大容量化・高速化のため、単一周波数の搬送波で伝送するシングルキャリア通信から、複数の周波数を同時に使用するマルチキャリア通信の需要が高まっている。

今回、マルチキャリア通信に対応するため、トランジスタ側から見た整合回路を見込んだ際の低周波領域のインピーダンスを低減する差周波短絡回路の配置と構成を最適化するこ

とで、衛星通信地球局として通信品質を確保するために要求される、最大離調周波数( $\Delta f$ )400MHzで三次相互変調歪(ひずみ)(third-order intermodulation : IM3)が $-25\text{dBc}$ 以下という低歪み特性を実現した。最小限の部品追加によって従来製品のKu帯70W GaN HEMT“MGFK48G3745”と同一パッケージサイズでKu帯衛星通信システムとして使用されている全帯域をカバーできるマルチキャリア通信にも対応できる70W GaN HEMT“MGFK48G3745A”と30W GaN HEMT“MGFK45G3745A”を製品化した。これらを追加したKu帯GaN HEMT製品のラインアップによって、衛星通信地球局の小型化と情報伝送量の大容量・高速化に貢献する。



## Ku帯衛星通信地球局用マルチキャリア対応GaN HEMT

高速通信が可能なKu帯衛星通信の需要が拡大しており、情報伝送量の大容量化・高速化に向けてマルチキャリア通信へのニーズが高まっている。三菱電機では、従来のKu帯70W GaN HEMTと同一パッケージのまま、Ku帯衛星通信システムの全帯域(375MHz)をカバーする離調周波数400MHzのマルチキャリア通信対応70W GaN HEMTと30W GaN HEMTを製品化し、Ku帯GaN HEMTのラインアップを拡充した。

## 1. まえがき

災害時の通信の確保や地上通信網の整備が地理的に難しい地域での通信手段として、高速通信が可能なKu帯衛星通信の需要が拡大している。三菱電機では、高出力／高効率動作、小型化に有利なGaNを用いた衛星通信地球局用GaN HEMTの製品化を進めてきた<sup>(1)(2)</sup>。また、衛星通信では更なる情報伝送量の大容量化・高速化のため、單一周波数の搬送波で伝送するシングルキャリア通信から、複数の周波数の搬送波を同時に使用するマルチキャリア通信の需要が高まっている。

今回、マルチキャリア通信に対応するため、トランジスタ側から見た整合回路の低周波領域のインピーダンスを低減する差周波短絡回路の配置と構成を最適化することで、 $\Delta f = 400\text{MHz}$ でIM3が $-25\text{dBc}$ 以下という低歪み特性を実現した。最小限の部品追加によって従来製品であるシングルキャリア通信対応のKu帯70W GaN HEMT(MGFK48G3745)(図1)と同一パッケージサイズでKu帯衛星通信システムとして使用されている全帯域をカバーし、さらにマルチキャリア通信に対応できる70Wと30W出力のKu帯衛星通信地球局用GaN HEMTを開発した。

本稿では、マルチキャリア通信に対応するために行った差周波短絡回路の基本設計手法と、それを適用したKu帯70W GaN HEMTとKu帯30W GaN HEMTの主要特性について述べる。

## 2. マルチキャリア通信対応 Ku帯70W GaN HEMT

### 2.1 差周波短絡回路の設計

まず、パッケージについては、シングルキャリア対応製品と同じサイズ・同じピン配置にすることを目標にした。これによって、従来製品からの置き替えが容易になり、

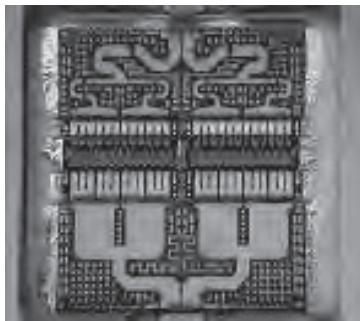


図1. MGFK48G3745

小型地球局の開発期間と開発コストを削減できる。

次に、パッケージ内部に実装する回路としてマルチキャリア通信に対応した低歪み整合回路を開発した<sup>(3)</sup>。図2に従来の出力整合回路の構成を示す。従来回路では、パッケージ外部のドレインバイアス回路に設けられた一つの短絡回路によって低周波領域の共振周波数を5MHz付近に設定している。図3(a)にトランジスタから整合回路を見込んだインピーダンスの計算結果を、図3(b)にIM3の $\Delta f$ 依存性の実測結果を示す。 $\Delta f$ は異なる周波数の二つの入力信号の周波数差を表す。周波数は14.125GHz帯、出力電力は1波当たりの信号レベルを40dBmとした。図3から $\Delta f = 5\text{MHz}$ 付近のインピーダンスは10Ω以下であるが、 $\Delta f = 100\text{MHz}$ 以上ではインピーダンスは100Ω以上と大きく、これに対応して、IM3は100MHz以上で急激に劣化している。このことから、差周波インピーダンスとIM3に強い相関があり、IM3が $-25\text{dBc}$ 以下を実現するためのインピーダンスの目標値は50Ω以下であることが分かる。

そこで、 $\Delta f$ を数MHzから400MHzにわたって、低周波領域のインピーダンスを低く抑制できる差周波数短絡回路について検討した。検討した差周波数短絡回路の共振周波数 $\Delta f_k$ は、式(1)によって与えられる。

$$\Delta f_k = f_L^{(2K-1)/(2n)} \cdot f_H^{(2n-2K+1)/(2n)} \dots \quad (1)$$

ここで、 $f_L$ 、 $f_H$ は $\Delta f$ の周波数範囲の最小周波数と最大周波数、 $n$ は差周波短絡回路の数を示す。図4に $n=3$ の場合での出力整合回路の低周波領域のインピーダンス例を示す。式(1)から、共振周波数は対数軸上に等間隔に割り当てられ、インピーダンスは均一に低減されていることが分かる。

この開発では、目標とする $\Delta f$ の範囲をKu帯衛星通信のマルチキャリア通信システムを全帯域カバーする1～375MHzと定めて検討した結果、短絡回路数を3とし、共

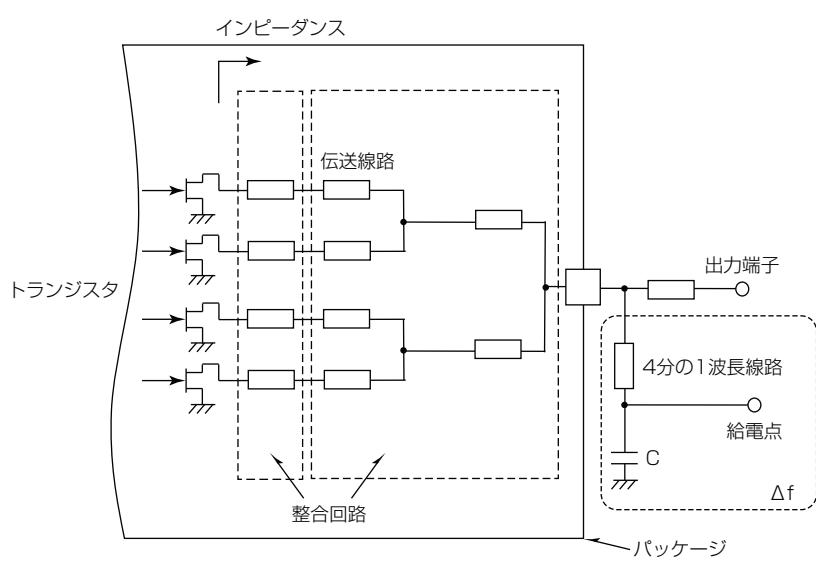


図2. 従来の出力整合回路の構成

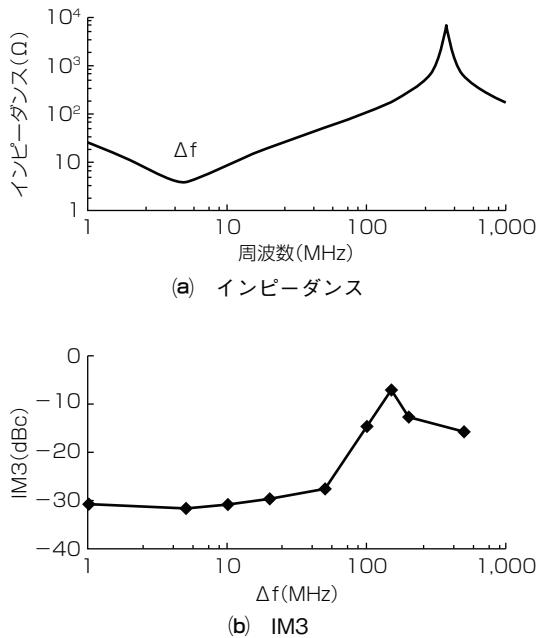


図3. 従来の出力整合回路の低周波領域のインピーダンスの計算結果とIM3の実測結果

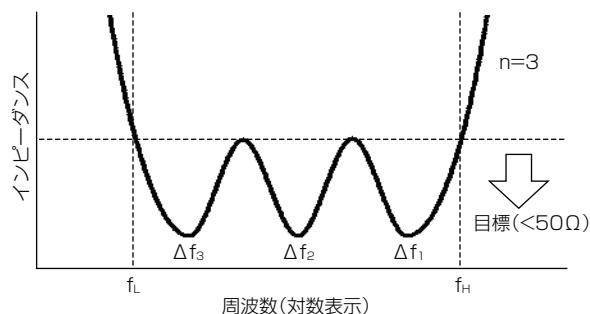


図4. 出力整合回路の低周波領域のインピーダンス例

振周波数を  $\Delta f_1 = 157\text{MHz}$ ,  $\Delta f_2 = 27\text{MHz}$ ,  $\Delta f_3 = 5\text{MHz}$  とすることが、 $\Delta f = 400\text{MHz}$ で、IM3が $-25\text{dBc}$ 以下を実現するのに最適であることが判明した。図5にマルチキャリア通信対応の出力整合回路の等価回路を示す。図に示すように、パッケージ内に二つの短絡回路を対称に設けて、パッケージ外に一つの短絡回路をバイアス回路と併用する構成を採用した。また、短絡回路とトランジスタ間の電気長を考慮し、差周波短絡回路の  $\Delta f_1$  はトランジスタに最も近く、 $\Delta f_3$  は最も遠い位置に配置した。図6に出力整合回路のインピーダンスの計算結果を示す。1~375MHzのインピーダンスは目標の $50\Omega$ 以下を満足している。

## 2.2 評価結果

図7に開発したマルチキャリア通信に対応可能なKu帯70W GaN HEMT(MGFK48G3745A)の内部写真を示す。内部に実装した差周波短絡回路は、4分の1波長線路と数nFのワイヤボンディングタイプのマイクロチップコンデ

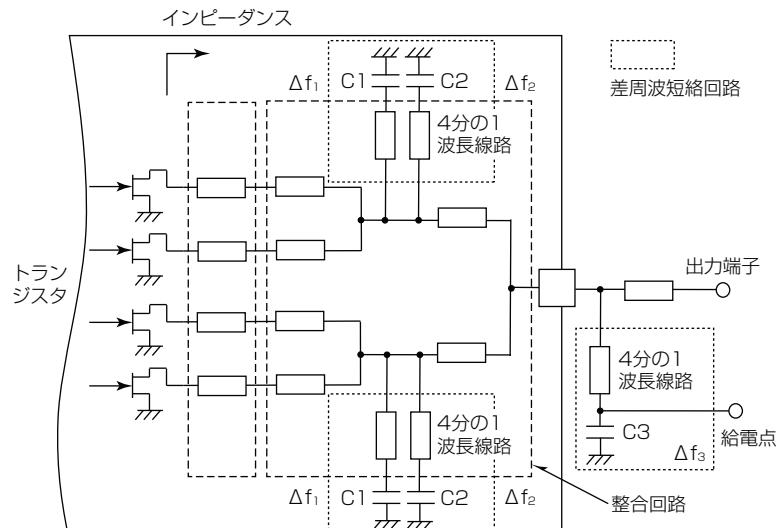


図5. マルチキャリア通信対応の出力整合回路の等価回路

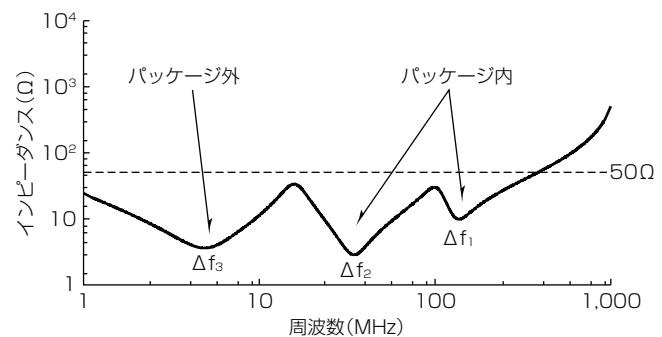


図6. 出力整合回路のインピーダンスの計算結果

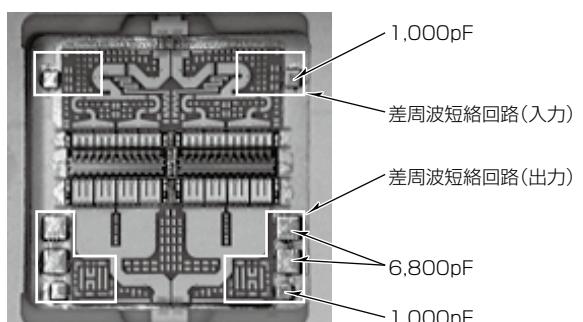


図7. MGFK48G3745A

ンサで構成した。また差周波短絡回路は入力整合回路と出力整合回路の両方に設けることでIM3の上側と下側の非対称性を改善した。

図8に  $\Delta f = 5\text{MHz}$  と  $\Delta f = 400\text{MHz}$  のIM3特性を示す。ドレイン電圧は24V、周波数は14.125GHz帯、2波信号入力時(CW(Continuous Wave)動作)である。衛星通信地球局として通信品質を確保するために要求されるIM3= $-25\text{dBc}$ を満足するときの出力電力(線形出力)は1波当たりの信号レベルで41dBmである。図9にIM3の  $\Delta f$  依存性を示す。

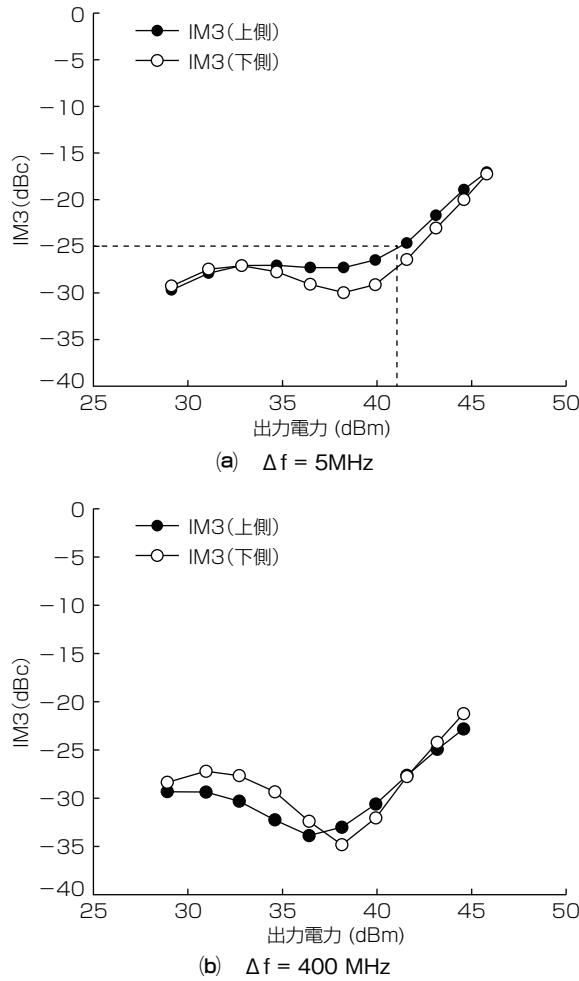
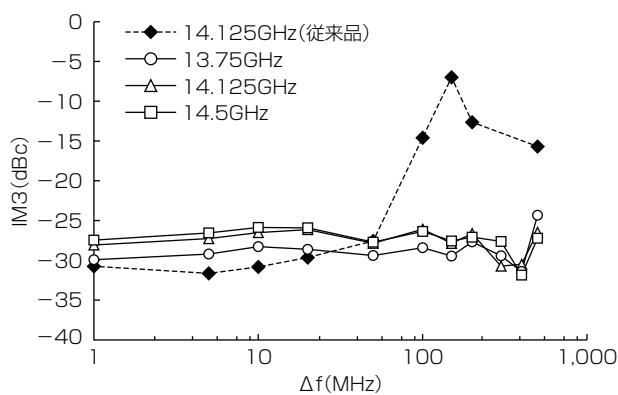


図8. MGFK48G3745AのIM3特性

図9. MGFK48G3745AでのIM3の $\Delta f$ 依存性

図中には、比較のために差周波短絡回路がパッケージ内に実装されていない従来製品の特性も示している。出力電力は1波当たりの信号レベルで40dBm、IM3は上側と下側の信号のうち、IM3の値が悪い方をプロットしている。図9から $\Delta f$ が1MHzから400MHzに至るまで-25dBc以下のIM3が得られており、このGaN HEMTは、マルチキャリア通信に対応可能であることが分かる。

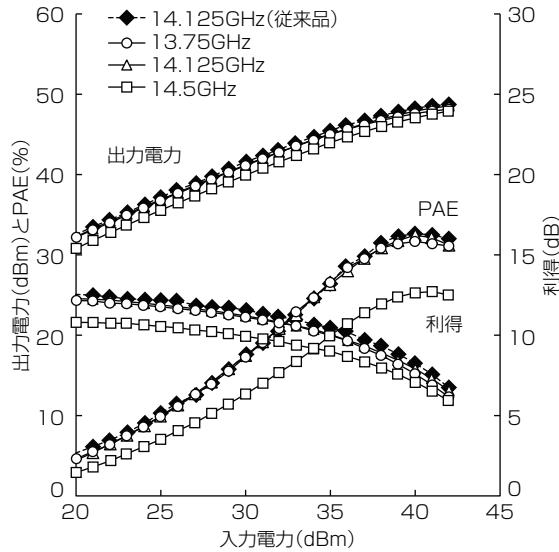


図10. MGFK48G3745Aの入出力特性

図10にMGFK48G3745Aの入出力特性を示す。差周波短絡回路がない従来製品の特性も併記している。周波数14.125GHzで、飽和出力48.6dBm(72.4W)、線形利得11.7dB、電力付加効率(Power Added Efficiency : PAE)31.2%であり、マルチキャリア通信に対応しながら、従来のシングルキャリア製品と同等の高出力で高利得な特性を実現した。

### 3. マルチキャリア通信対応 Ku帯30W GaN HEMT

衛星通信用増幅器に対する出力電力に関しては、単なる高出力化だけでなく、比較的低出力な製品に対しても要求がある。これは、小形地球局にはサイズやコストに応じた様々な出力電力の製品があるためである。今回、三菱電機では、比較的低出力な製品需要に対応するために、マルチキャリア通信に対応可能なKu帯30W GaN HEMT(MGFK45G3745A)の開発も行った。パッケージサイズは、Ku帯70W GaN HEMTとの互換性を考慮し、同一パッケージを使用した。パッケージ内部には70W品と同じGaN HEMTチップが一つだけ実装されている。パッケージ内部に実装する整合回路は70W品と同じコンセプトで設計してマルチキャリア通信に対応した整合回路を採用した。

図11にMGFK45G3745Aの入出力特性を示す。周波数14.125GHzで、飽和出力46.0dBm(39.8W)、線形利得10.5dB、PAE36.3%の良好な特性が得られた。図12にIM3の $\Delta f$ 依存性を示す。出力電力は1波当たりの信号レベルで36.3dBmである。 $\Delta f$ が1MHzから500MHzに至るまで、-25dBc以下のIM3を満足し、衛星通信システムの出力電力や用途に応じたラインアップ拡充の一環として低出力品の製品化を実現できた。

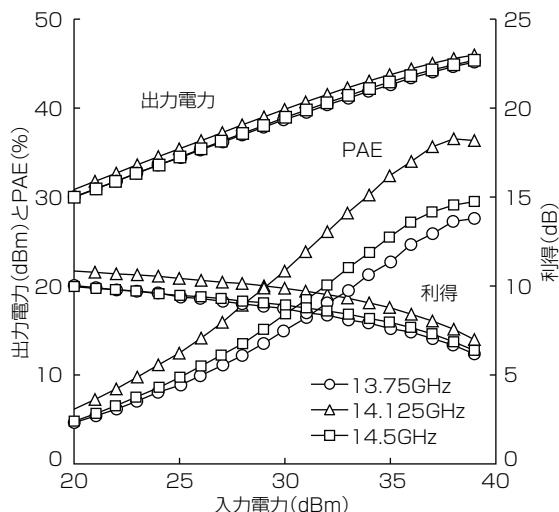
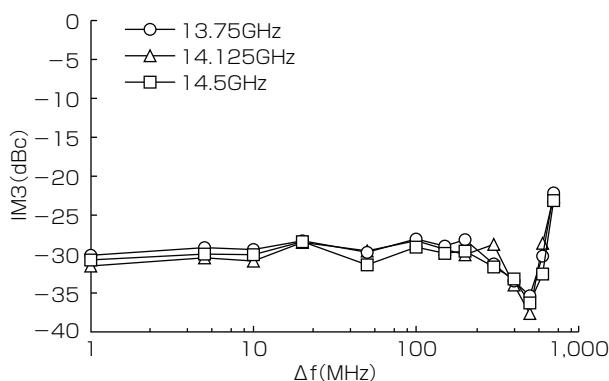


図11. MGFK45G3745Aの入出力特性

図12. MGFK45G3745AでのM3の $\Delta f$ 依存性

## 4. む す び

Ku帯衛星通信地球局用増幅素子として、従来製品のシングルキャリア通信対応Ku帯70W GaN HEMT(MGFK48G3745)と同一サイズのパッケージを用い、マルチキャリア通信に対応した低歪み特性を実現できる整合回路の採用によって、 $\Delta f$ が400MHzのマルチキャリア通信対応Ku帯70W GaN HEMT(MGFK48G3745A)とその低出力版のKu帯30W GaN HEMT(MGFK45G3745A)を製品化した。これら、Ku帯GaN HEMT製品のラインアップによって、衛星通信地球局の小型化と情報伝送量の大容量・高速化に貢献する。

なお、今回の製品は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業の成果の一部を活用している。

## 参 考 文 献

- (1) 國井徹郎, ほか: Ku帯衛星通信用高利得・高出力内部整合型 GaN HEMT, 三菱電機技報, 91, No.5, 293~296 (2017)
- (2) 前原宏昭, ほか: Ku帯100W出力GaN HEMT増幅器, 三菱電機技報, 87, No.2, 113~115 (2013)
- (3) Yoshioka,T., et al.: A Ku-band 70-W Class GaN Internally Matched High Power Amplifier with Wide Offset Frequencies of up to 400MHz for Multi-Carrier Satellite Communications, 2020 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium(BCICTS) (2020)

# 第5世代移動通信システム基地局向け 小型GaNドハティ増幅器モジュール

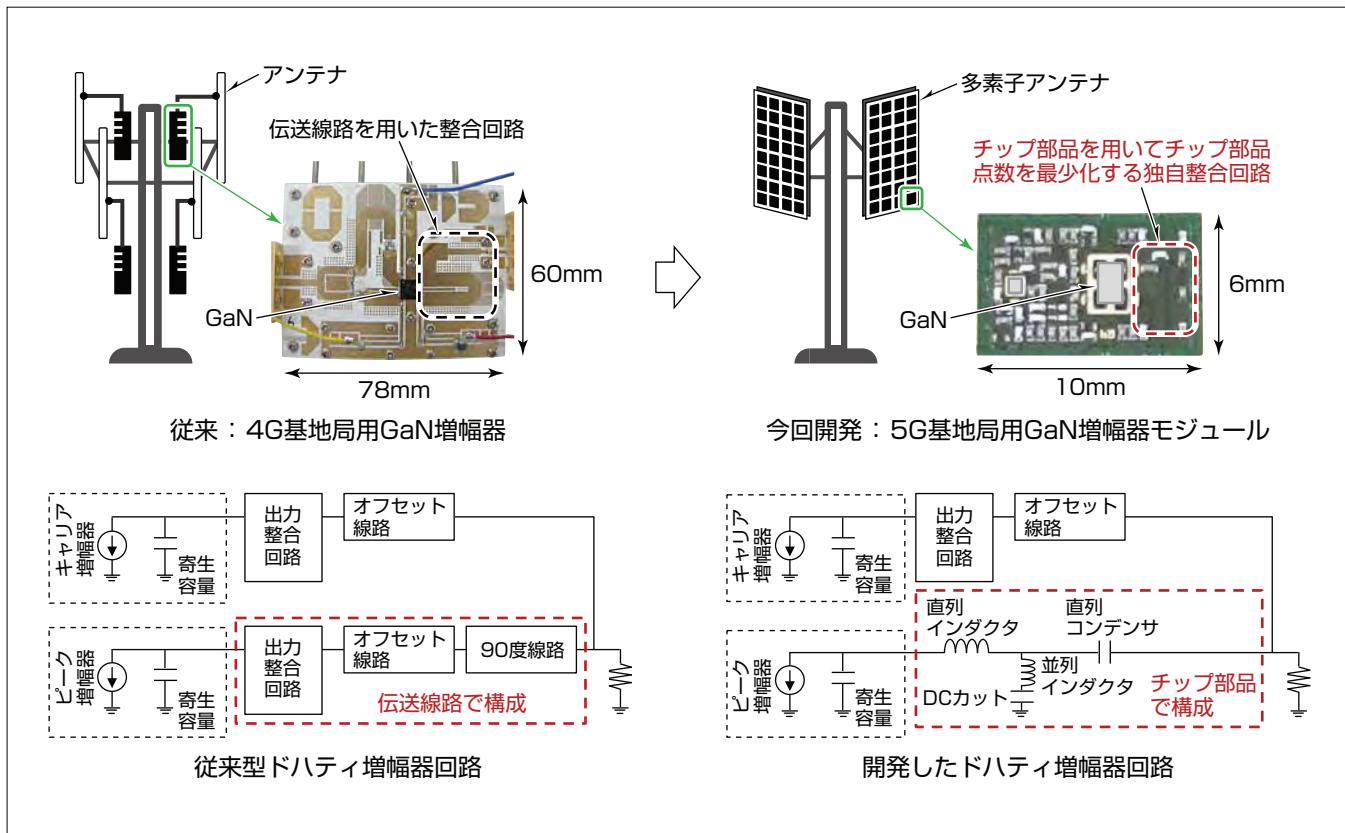
Compact GaN Doherty Power Amplifier Module for 5G Base-stations

坂田修一\*  
Shuichi Sakata  
嘉藤勝也†  
Katsuya Kato  
寺西絵里†  
Eri Teranishi  
小松崎優治\*  
Yuji Komatsuaki  
山中宏治\*  
Koji Yamanaka

## 要旨

近年、急速に拡大する高速・大容量通信の需要に応えるため、移動通信システムは第4世代(4G)から第5世代(5G)に変わりつつある。5G基地局では、多素子アンテナが採用され、各部品が密に配置されるため、5G用増幅器には大幅な小型化が求められる。さらに、基地局全体の低消費電力化のための高効率化、基地局の小型化・低コスト化の観点から複数バンドに対応可能な広帯域性が求められる。従来の4G基地局用では高効率・広帯域に動作させるため伝送線路を用いたドハティ増幅器が用いられてきたが、その構成では小型化が困難であった。今回、伝送線路で構成していた回路と同等の電気特性を持つ回路をチップ部品で構成

することで、小型化・高効率・広帯域を並立させる独自回路を開発し、小型GaN(窒化ガリウム)ドハティ増幅器モジュールを試作・評価した。20MHz変調帯域の信号を用いて評価した結果、5Gで使用される主要帯域3.4~3.8GHzで、歪(ひず)み補償後のACLR(Accidental Channel Leakage Ratio)が-50dBcを満たした上で、50.4~54.8%のドレイン効率を達成した。この結果は、開発した回路が小型・高効率・広帯域が求められる5G基地局に有効であること、さらにGaNデバイスの新たな可能性を示すものである。



## 従来の4G基地局用GaNドハティ増幅器と今回開発した5G基地局用GaNドハティ増幅器モジュール

5G基地局用に小型GaNドハティ増幅器モジュールを試作した。開発したドハティ増幅器回路では、ピーク増幅器側の回路について伝送線路で構成していた回路と同等の電気特性を持つ回路をチップ部品で構成してモジュールに適用することで、小型・高効率・広帯域を並立させる動作を実現した。

## 1. まえがき

近年、急速に拡大する高速・大容量通信の需要に応えるため、移動通信システムは第4世代(4G)から第5世代(5G)に変わりつつある。5G基地局では、多数同時接続を実現するために、多素子アンテナ(massive MIMO(Multi Input Multi Output)アンテナ)が採用される。この多素子アンテナでは、アンテナに加えて、高周波部品が密に配置されることから各部品の小型化が必須である。増幅器に関しても同様であり、第4世代用増幅器と比較して、第5世代用増幅器では大幅な小型化を実現しなければならない<sup>(1)</sup>。また、発熱・消費電力の大きい増幅器には多素子アンテナでの放熱機構の簡略化と基地局全体の低消費電力化のために高効率化が求められる。さらに5Gでは、高速・大容量通信に向けてピーク帯平均電力比(Peak-to-Average Power Ratio : PAPR)が大きく、変調帯域幅が広帯域な信号が使用されるため、増幅器には飽和から大バッックオフした点での高効率化と広帯域性さらには歪み保障による線形性が求められる。これらのことから、第5世代用増幅器には①小型、②高効率、③広帯域性、④歪み補償による線形性の四つの要素が同時に求められる。

このような課題を解決する手段としてGaNを用いたドハティ増幅器が有力な候補として考えられている。GaNは耐電圧がSi(シリコン)やGaAs(ガリウムヒ素)よりも大きく、電力密度が高いため小型化・広帯域化に有利である。またドハティ増幅器はバッックオフでの効率改善が可能である。しかし、ドハティ増幅器はキャリア増幅器の出力端に接続される4分の1波長線路を用いて、バッックオフでの効率改善を図っているため、バッックオフで高効率を示す帯域は狭帯域になる。一方で、この狭帯域を改善するためにピーク増幅器側に2分の1波長線路の整数倍の線路を付加することによって、広帯域化することが知られている<sup>(2)(3)</sup>。この2分の1波長線路は、キャリア増幅器側の4分の1波長線路で付加される周波数特性と逆特性を持ち、その4分の1波長線路の周波数特性を補償することから周波数補償回路と呼ぶ。この手法によって広帯域は達成されるが、ピーク増幅器出力端に2分の1波長線路の整数倍の線路とキャリア増幅器の入力端に2分の1波長線路の整数倍から4分の1波長分を引いた線路を付加しなければならぬので回路が大型化し、第5世代用増幅器には適用困難であるという課題があった。

そこで、新規に小型周波数補償回路を考案し、その回路を採用した5G基地局向け小型GaNドハティ増幅器モジュールを開発した。

本稿では、考案した小型周波数補償回路と、この回路を

採用した小型GaNドハティ増幅器モジュールの設計・試作・評価について述べる。

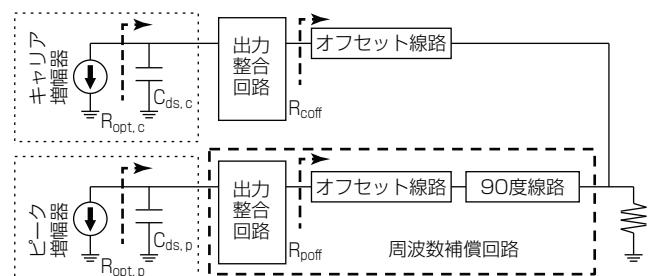
## 2. 5G基地局用GaNドハティ増幅器モジュールの回路設計

### 2.1 小型周波数補償回路

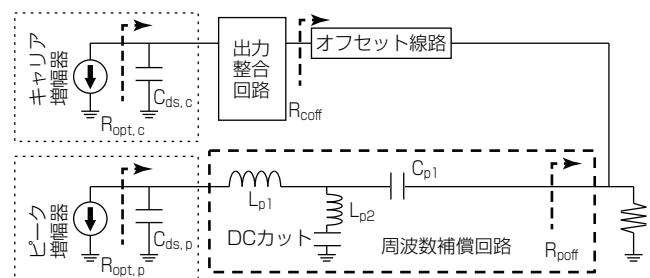
図1(a)に従来型周波数補償回路を用いたドハティ増幅器回路、図1(b)に今回開発した周波数補償回路を用いたドハティ増幅器回路を示す。

まず従来型の回路について述べる。トランジスタには必ず寄生容量が存在するため、トランジスタの電流源での最適負荷は出力整合回路によってインピーダンス変成されなければならない。ここではキャリア増幅器側、ピーク増幅器側の寄生容量をそれぞれ $C_{ds,c}$ 、 $C_{ds,p}$ と、トランジスタの電流源での最適負荷をそれぞれ $R_{opt,c}$ 、 $R_{opt,p}$ とする。図1(a)に示すようにトランジスタの最適負荷は出力整合回路によってそれぞれ $R_{coff}$ 、 $R_{poff}$ に変成される。これらの出力整合回路の出力端にはそれぞれオフセット線路が付加され、キャリア増幅器側は寄生容量と出力整合回路、オフセット線路を含めて等価的90度になるように設計される。

ピーク増幅器側も同様に寄生容量と出力整合回路、オフセット線路を含めて等価的180度又はその整数倍になるよう設計される。バッックオフ時でピーク増幅器は完全にオフしているため、この等価的180度を構成している回路がオープンスタブとしての機能を持つ。このオープンスタブは中心周波数でオープン、高周波側で容量性、低周波側で誘導性のインピーダンスを持つため、キャリア増幅器側の等価的90度を構成する回路と逆特性を持ち、その周波数



(a) 従来型周波数補償回路を持つドハティ増幅器回路



(b) 開発した小型周波数補償回路を持つドハティ増幅器回路

図1. ドハティ増幅器回路の比較

特性を補償し、広帯域動作が可能になる。

一方、開発した回路では、ピーク増幅器側回路は、出力整合回路とオフセット線路の代わりに、直列インダクタ $L_{p1}$ 、並列インダクタ $L_{p2}$ 、直列コンデンサ $C_{p1}$ の三つの集中定数で構成される。キャリア増幅器側回路は従来回路と同様である。開発した回路では、周波数補償回路と出力整合回路の両機能を回路に持たせることが可能である。両機能を持たせる回路パラメータは解析的に解くことができ、次の式で表される。

$$\omega_0 L_{p1} = \frac{Q_{\text{FET}} - Q_1}{1 + Q_{\text{FET}}^2} R_{\text{opt. p}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\omega_0 L_{p2} = \frac{\gamma_1}{Q_1 + Q_2} R_{\text{opt. p}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\omega_0 C_{p1} = \frac{1}{\gamma_2 Q_2 R_{\text{opt. p}}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $Q_{\text{FET}} = \omega_0 R_{\text{opt. p}} C_{ds, p}$ 、 $\gamma_2 = R_{\text{poff}} / R_{\text{opt. p}}$ である。また $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $\gamma_1$ は $Q_{\text{FET}}$ と $\gamma_2$ を用いて次のように表される。

$$Q_1 = \frac{-1 + \sqrt{\gamma_2}(1 + Q_{\text{FET}}^2)}{Q_{\text{FET}}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_2 = \frac{Q_{\text{FET}} - Q_1}{1 + Q_{\text{FET}} Q_1} \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$\gamma_1 = \frac{1 + Q_1^2}{1 + Q_{\text{FET}}^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

したがって、トランジスタのロードブルデータから最適負荷 $R_{\text{opt. p}}$ と寄生容量 $C_{ds, p}$ が抽出され、インピーダンス変成比 $\gamma_2$ が決定されたならば、これらの回路定数は一意に決定される。図2は、様々なインピーダンス変成比 $\gamma_2$ で飽和時とバックオフ時に電力合成点からピーク増幅器側を見たインピーダンスシミュレーション結果である。飽和時とバックオフ時の計算結果をそれぞれ $\Gamma_{p, \text{sat}}$ 、 $\Gamma_{p, \text{B.O.}}$ と表している。これらを計算するための回路図を図2(a)(b)に示している。図2(c)に計算した結果をスミスチャート上に示している。このスミスチャートの中心は、ピーク増幅器の

最適負荷 $R_{\text{opt. p}}$ で規格化されている。図から $\Gamma_{p, \text{sat}}$ は所望のインピーダンス変成比に変成されており、 $\Gamma_{p, \text{B.O.}}$ は周波数補償回路と同様の特性を示している。つまり、 $\Gamma_{p, \text{B.O.}}$ は中心周波数でオープンであり、高周波側で容量性、低周波側で誘導性である。したがって、開発した回路を用いることによってサイズを大きくすることなく、ドハティ増幅器の広帯域化とインピーダンス変成に設計の自由度を持たせることが可能である。

開発した周波数補償回路を用いて、2段GaNドハティ増幅器モジュールを設計した。図3に全体の設計回路を示す。最終段ドハティ増幅器に使用しているキャリア及びピーク増幅器側トランジスタには当社製GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) を用いて、そのゲート幅は、それぞれ2.4mmと4.0mmである。この開発した回路をドハティ増幅器の出力合成器に使用し、このときのインピーダンス変成比 $\gamma_2$ は帯域と回路損失のトレードオフから0.7に設定した。トランジスタとモジュール基板を接続するワイヤはピーク増幅器の $L_{p1}$ に含めている。キャリア増幅器は、トランジスタとモジュール基板を接続するワイヤ $L_{c1}$ と並列インダクタ $L_{c2}$ 、オフセット線路 $TL_{c1}$ で構成した。

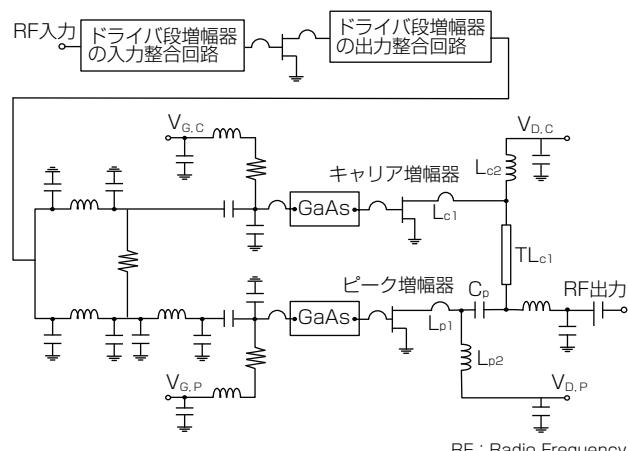


図3. 全体の設計回路

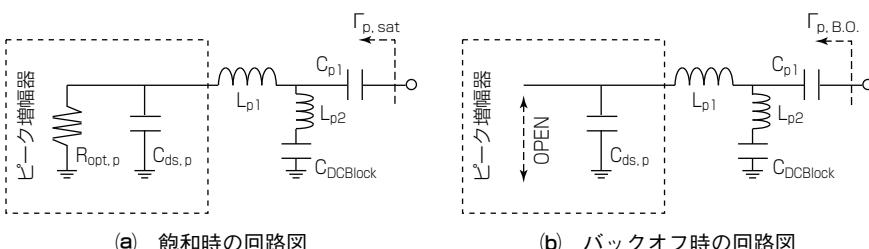
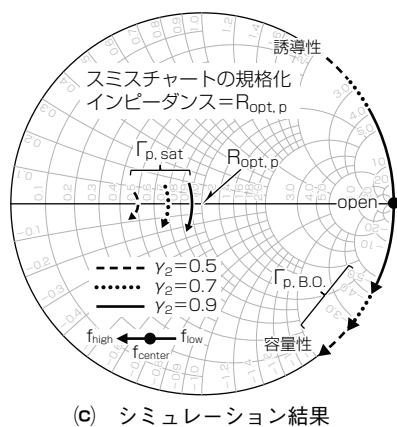


図2. インピーダンスシミュレーション結果



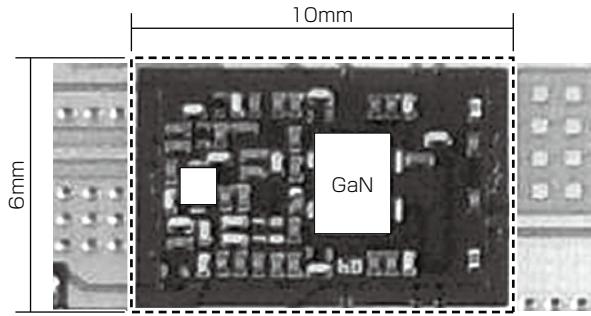


図4. 2段GaNドハティ増幅器モジュール

## 2.2 入力回路とドライバ段増幅器

最終段ドハティ増幅器の入力回路とドライバ段回路の回路要素は全てGaAs MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)とSMD(Surface Mount Device)部品で構成されている。GaAs MMICはトランジスタの入力端に配置され、安定化回路と一部の整合回路が含まれている。ピーク増幅器の入力に付加する位相調整線路は、パイ型回路によって構成されている。同様にウィルキンソン分配器もパイ型回路によって構成されている。

ドライバ段増幅器は、ウィルキンソン分配器の入力端に接続されている。ドライバ段増幅器のトランジスタも当社製GaN HEMTを使用している。また出力整合回路と入力整合回路は共に小型化のためSMD部品で構成した。

これら全ての要素を $10 \times 6$ (mm)の多層樹脂基板に集積し、上からモールド封止した構成にした。

図4に2段GaNドハティ増幅器モジュールの写真を示す。

## 3. 評価結果

2段GaNドハティ増幅器モジュールを評価基板(Evaluation Board: EVB)に実装して評価を行った。全ての評価結果の端面はモジュール端である。ドレイン電圧は39Vに設定し、ゲート電圧に関しては、最終段ドハティ増幅器のキャリア增幅器とドライバ段増幅器はAB級になるように、最終段ドハティ増幅器のピーク増幅器はC級になるように設定した。

図5に周波数3.6GHzで、無変調パルス信号を用いて評価した結果を示す。図では最終段ドハティ増幅器のドレイン効率(Drain Efficiency: DE)と、増幅器全体の電力付加効率(Power Added Efficiency: PAE)と利得を出力電力( $P_{out}$ )の関数として表している。図から、ドハティ増幅器に特徴的なバックオフでの効率の改善が見られることが分かる。周波数3.6GHzでは、飽和出力電力( $P_{sat}$ ) = 45.3dBm, 8dBバックオフでの最終段ドレイン効率DE(最終段DE) = 53.7%, 8dBバックオフでのPAE = 44.8%

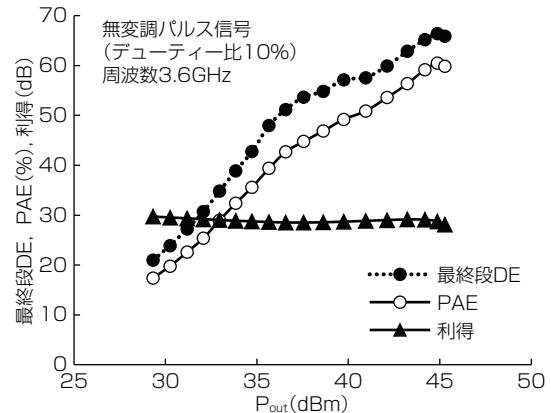


図5. 無変調パルス信号を用いて評価した結果

という特性が得られた。

図6に周波数3.5GHzで、ピーカー帯平均電力比(PAPR)8.0dB、変調帯域20MHzの変調信号を用いて評価した結果を示す。図では、デジタル歪み補償(Digital Pre-Distortion: DPD)前後の隣接チャネル漏洩(ろうえい)電力比(ACLR)とPAE、利得を $P_{out}$ の関数として表している。DPD後のACLRが-50dBcを満足する最大のPAEとして、47.8%が得られた。

図7にPAPR8.0dB、変調帯域20MHzの変調信号を用いて評価した結果の周波数特性を示す。図では、DPD後のACLRが-50dBcを満足する最大の利得と $P_{out}$ 、PAE、最終段DEが周波数の関数として表されている。3.4~3.8GHzの周波数領域で、開発した2段GaNドハティ増幅器モジュールの特性として、PAE42.9~47.8%，最終段DE50.4~54.8%，利得26.9~28.6dB， $P_{out}$ 37.7~38.5dBmという特性が得られた。

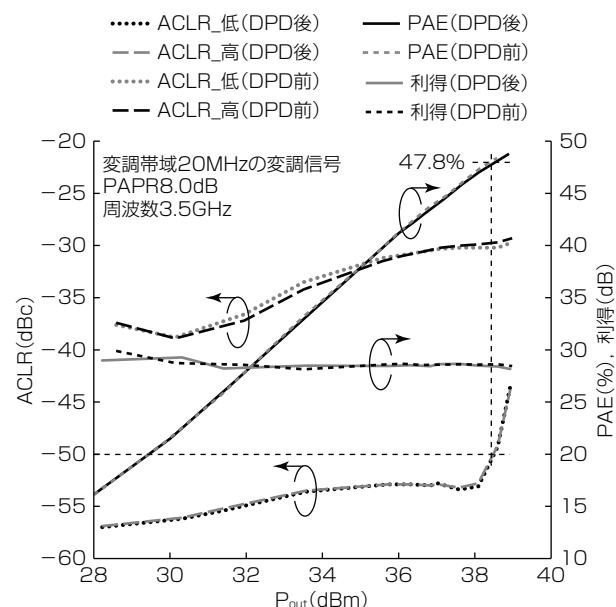


図6. PAPR8.0dB、変調帯域20MHzの変調信号を用いて評価した結果

表1. ドハティ増幅器の比較

増幅器	年	周波数(GHz)	サイズ(mm)	最終段DE(%)	PAE(%)	P <sub>out</sub> (dBm)	PAPR(dB)
Ozen等の増幅器 <sup>(4)</sup>	2014	3.5	100×95	58.0	52.0	35.5	9.0
	2014	3.5	100×95	56.0	51.0	34.8	9.7
Komatsuzaki等の増幅器 <sup>(2)</sup>	2017	3.0~3.6	78×60	45.9~50.2		34.1~34.6	7.5
今回開発の増幅器	2020	3.4~3.8	10×6	50.4~54.8	42.9~47.8	37.7~38.5	8.0

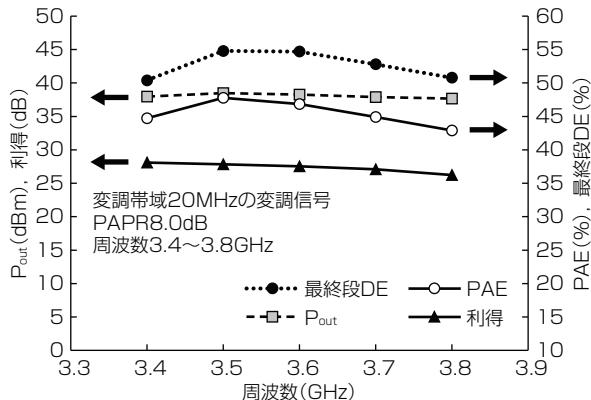


図7. PAPR8.0dB, 変調帯域の20MHzの変調信号を用いて評価した結果の周波数特性

変調帯域20MHzの10CA信号, PAPR8.0dB, DPD後(TM3.1 FDD)

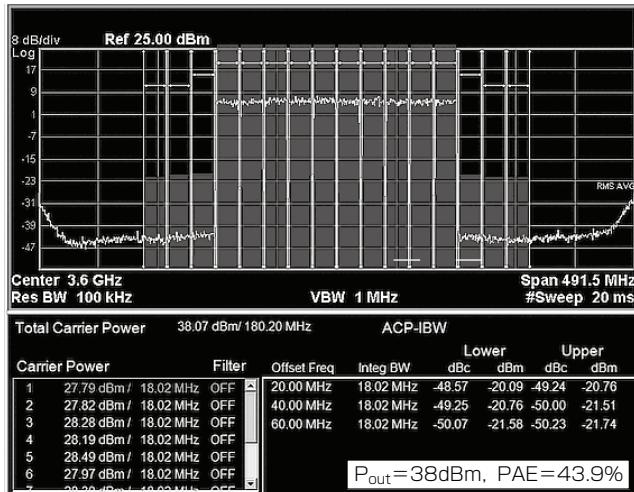


図8. 複数キャリアを用いた変調信号の評価結果

表1に開発した2段GaNドハティ増幅器モジュールとKomatsuzaki等<sup>(2)</sup>やOzen等<sup>(4)</sup>が報告している3~4GHz帯のドハティ増幅器との比較を示す。開発したドハティ増幅器モジュールと類似したサイズのドハティ増幅器に関する報告は少ないが、開発した2段GaNドハティ増幅器モジュールが他の他のサイズの非常に大きいドハティ増幅器と比較してほぼ同等の効率が得られていることが分かる。このことから、今回開発したドハティ増幅器モジュールが小型化・高効率化・広帯域化に有利であり、5Gで使用される多素子アンテナに有利であることが示された。

開発した2段GaNドハティ増幅器モジュールの広帯域性を示すために複数キャリアを用いた信号の評価を実施した。この評価では20MHzの変調帯域信号(1 Carrier Component : 1CC)を10個束ねて(10 Carrier Aggregated : 10CA)、PAPRが8.0dBの信号を用いて評価を実施した。図8にその評価結果を示す。図から、開発したドハティ増幅器モジュールはDPDによって線形化可能であることが分かる。このとき、PAE = 43.9%，P<sub>out</sub> = 38dBm、ACLR = -48.6dBcが得られた。この結果から、5Gで使用される広帯域変調信号にも対応可能であることが示された。

#### 4. む す び

5Gで使用される多素子アンテナに対応するために、小型周波数補償回路を新たに開発した。同回路を用いて2段GaNドハティ増幅器モジュールを設計・試作・評価した結果、10×6 (mm)と小型ながら、それよりも非常に大きなサイズのドハティ増幅器と同等の効率が得られた。また評価結果の周波数特性から、開発したドハティ増幅器モジュールが6GHz以下の5Gで使用される重要な帯域である3.4~3.8GHzの広帯域にわたって、高い効率を示すことが分かった。また、複数キャリア信号の評価結果から線形性も優れていることを示すことができた。開発した回路は小型・高効率・広帯域・線形性が求められる5G基地局局に有効であり、さらにGaNデバイスの新たな可能性を示すものである。

#### 参 考 文 献

- (1) Yamazaki, K., et al.: DL MU-MIMO Field Trial with 5G Low SHF Band Massive MIMO Antenna, 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (2017)
- (2) Komatsuzaki, Y., et al.: 3.0~3.6GHz wideband, over 46% average efficiency GaN Doherty power amplifier with frequency dependency compensating circuits, 2017 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (2017)
- (3) Qureshi, J. H., et al.: A 700-W peak ultra-wideband broadcast Doherty amplifier, 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (2014)
- (4) Ozen, M., et al.: Symmetrical doherty amplifier with high efficiency over large output power dynamic range, 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (2014)

# 衛星搭載用Ka帯GaN HEMTの高効率化

High-efficiency Ka-band GaN High Electron Mobility Transistor for Space Applications

津波大介\*  
Daisuke Tsunami  
柳生栄治†  
Eiji Yagyu  
加茂宣卓‡  
Yoshitaka Kamo

西口浩平‡  
Kohei Nishiguchi  
三木耕平§  
Kohei Miki

## 要旨

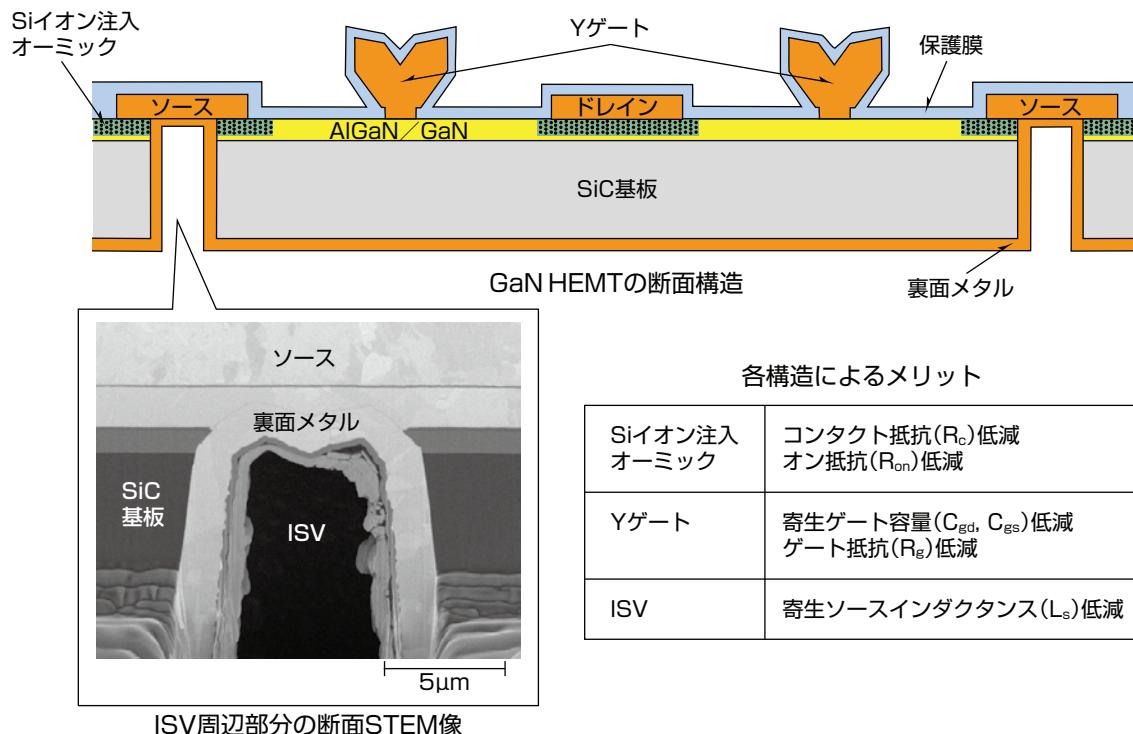
近年、衛星搭載用電力増幅器の小型化・軽量化・長寿命化を目的とした、従来の進行波管増幅器(Traveling Wave Tube Amplifier : TWTA)からGaN(窒化ガリウム)HEMT(High Electron Mobility Transistor)を用いた固体電力増幅器への置き換えが進んでいる。GaN HEMTは従来のGaAs(ガリウムヒ素)HEMTに比べて出力電力を飛躍的に高めることができるが、Ka帯を含むミリ波帯を活用した高速・大容量通信への適用に向けて更なる高効率化が求められている。

従来、大電流駆動が可能な高Al(アルミニウム)混晶比を持つAlGaN(窒化アルミニウムガリウム)バリア層に対して、低抵抗なオーミックコンタクトを形成することが困難であったが、Si(シリコン)イオン注入技術を用いて電極／

AlGaNバリア層間の電位障壁を小さくすることで可能にし、コンタクト抵抗とオン抵抗を低減した。また、ゲートの断面形状をY型にすることで低いゲート抵抗を保持したままゲート／基板間で形成される寄生ゲート容量を低減した。さらに、ソース直下に微細ISV(Individual Source Via)を形成することで、ソースとビアホールパッド間の伝送線路による寄生ソースインダクタンスを低減した。

これらによって、ユニットセル当たり1W級の高出力GaN HEMTで、Ka帯動作時の電力付加効率を世界最高<sup>(注1)</sup>になる60%まで向上させた。開発したGaN HEMTをMMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)に搭載することで固体電力増幅器の高効率化が可能になった。

(注1) 2021年2月5日現在、当社調べ



## 衛星搭載用Ka帯GaN HEMTの断面構造と特長

Ka帯を超える高周波数帯でGaN HEMTの高効率動作を実現するためには、トランジスタの寄生成分( $R$ ,  $L$ ,  $C$ )低減が課題になる。Siイオン注入技術を用いてAlGaNバリア層の一部に選択的にSiを注入し、コンタクト抵抗( $R$ )及びオン抵抗( $R$ )を低減した。さらに、ゲートの断面形状をY型にすることで寄生ゲート容量( $C$ )を低減し、ソース直下に微細ISVを形成することで寄生ソースインダクタンス( $L$ )を低減した。

## 1. まえがき

災害時の通信手段確保や地球観測データ量の増加に伴い、Ka帯を含むミリ波帯を活用した高速・大容量の衛星通信の需要が高まっている。従来、衛星搭載用電力増幅器にはTWTが用いられてきたが、近年、小型化・軽量化・長寿命化を目的として、GaN HEMTを用いた固体電力増幅器への置き換えが進んでおり、固体電力増幅器の更なる高性能化が求められている。

Ka帯を超える高周波帯でHEMTを動作させるためにはゲート長の微細化が必須であり、これまでに三菱電機では、電子線露光技術に比べて高スループット処理が可能なレジストシュリンクプロセスを用いて、 $0.20\mu\text{m}$ 以下の短ゲート長( $L_g$ )を持つGaAs HEMTを実現している<sup>(1)</sup>。この技術をGaN HEMTに展開することでGaN HEMTの高周波動作化を達成<sup>(2)</sup>しているが、更なる高効率化のためにGaN HEMTの寄生成分低減が課題であった。

今回、Siイオン注入技術を用いることで高Al混晶比を持つAlGaN/GaN HEMTのコンタクト抵抗( $R_c$ )とオン抵抗( $R_{on}$ )を低減した。また、ゲート断面形状をY型にすることで低いゲート抵抗( $R_g$ )を保持しつつ寄生ゲート容量( $C_g$ )を低減した。さらに、ソース直下に微細ISVを形成することで寄生ソースインダクタンス( $L_s$ )を低減した。これらによって、Ka帯で動作可能な高出力GaN HEMTの高効率化を実現した。

本稿では、開発したGaN HEMTの素子構造、評価結果について述べる。

## 2. 等価回路パラメータの抽出

素子構造の最適化に当たり、ネットワークアナライザを用いて各素子のSパラメータを測定し、図1の小信号等価回路とフィッティングプログラムを用いて等価回路パラメータを抽出した。特に記載のない限り、ユニットゲート幅 $W_{gu} = 52\mu\text{m} \times 8$ 本の1セルトランジスタを用い

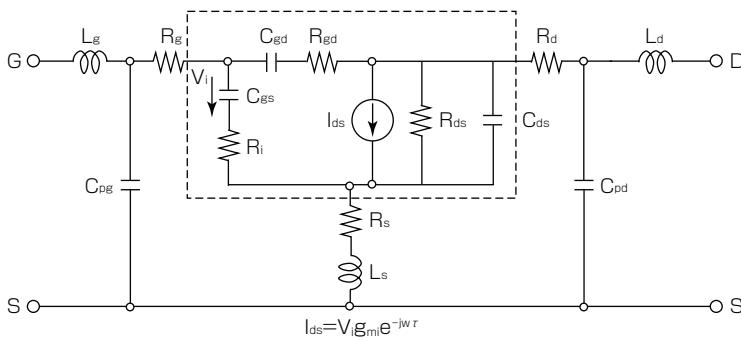


図1. HEMTの小信号等価回路

て、0.5GHzから35GHzの周波数範囲で測定した。等価回路パラメータは点線枠で囲まれたHEMTの真性成分とそれ以外の外因成分からなる。外因成分は電極パッドや伝送線路によって生じた寄生容量や寄生インダクタンスからなり、真性成分とあらかじめ分離した。 $C_g$ はゲート-ソース間容量( $C_{gs}$ )とゲート-ドレイン間容量( $C_{gd}$ )に分けられる。本稿では、高周波動作化に寄与する $R_g$ 、 $C_{gs}$ 、 $L_s$ と、高利得化・高効率化に寄与する $C_{gd}$ に着目し、素子構造を最適化した。

## 3. 素子構造

### 3.1 Siイオン注入オーミック

電力密度(Power Density : PD)及び電力付加効率(Power Added Efficiency : PAE)を向上させるためには、オン抵抗低減が有効であり、キャリア濃度( $N_s$ )を高めることで実現できる。GaN HEMTの場合、 $N_s$ はAlGaN/GaN界面に分極効果で生じる二次元電子ガス(2 Dimensional Electron Gas : 2DEG)濃度によって定まるため、AlGaNバリア層のAl混晶比を高めることが一般的に行われる。今回開発した素子では、30%を超える高Al混晶比のAlGaNバリア層を用いることにした。しかしながら、AlGaNバリア層のバンドギャップが大きくなることに起因して、ソース、ドレイン直下に低抵抗なオーミックコンタクトを形成することが困難になった。そこで、ソース、ドレイン直下のAlGaNバリア層内に選択的にSiイオンを注入し、窒素雰囲気下での活性化熱処理を行うことでn型のAlGaNバリア層を形成した。さらに、AlGaNバリア層上に電極を形成し、再度熱処理を加えることでオーミックコンタクトを実現した。TLM(Transfer Length Method)法によって得られた $R_c$ は $0.19\Omega \cdot \text{mm}$ と十分低い値が得られた。図2に作製した素子のI-V特性を示す。飽和ドレイン電流( $I_{max}$ )は $1.68\text{A/mm}$ と高く、 $R_{on}$ は $1.65\Omega \cdot \text{mm}$ と低い値が得られ

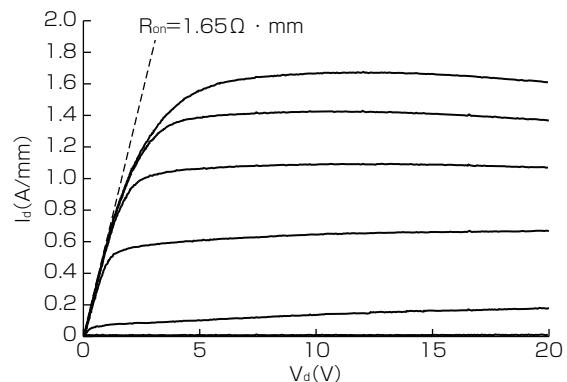


図2. I-V特性

た。なお、Siイオンを注入せずに作製した素子では、オーミックコンタクトを形成できず、ドレイン電流が全く流れなかった。

### 3.2 Y型ゲート構造

図3(a)にT型ゲートの断面構造を、図3(b)にY型ゲートの断面構造を示す。どちらの構造も高耐圧化のために電極部分が保護膜上に乗り上げた形状(ゲートフィールドプレート)を持っている。これらの構造では、ゲート容量はゲート直下の2DEGとの間で形成される真性容量とゲートフィールドプレートのオーバーラップ部分に起因した寄生容量で構成される。真性容量低減は短L<sub>ov</sub>化によって達成できるが、寄生容量低減はゲートフィールドプレートのオーバーラップ長(L<sub>ov</sub>)を短くする必要がある(図3(c))。

T型ゲートは一般的に蒸着リフトオフプロセスを用いて形成されるが、ゲート蒸着時にレジスト下にメタルが回り込むため、ゲート端断面は順テーパー形状になる。このため、寄生容量低減を目的にL<sub>ov</sub>を短くすると、ゲートヘッド長(L<sub>gh</sub>)も同時に短くなり、ゲート断面積が小さくなる結果、ゲート抵抗(R<sub>g</sub>)は大きくなる(図4)。

この課題を解決するため、Y型の断面形状を持つゲート構造を開発した(図3(b))。Y型ゲートではL<sub>ov</sub>と独立にL<sub>gh</sub>を設定できるため、L<sub>gh</sub>を十分大きくすることで、低いR<sub>g</sub>を保持したままC<sub>g</sub>を低減できる。試作したY型ゲートのR<sub>g</sub>はT型ゲート比の40%以下まで低減した(図4)。一方、

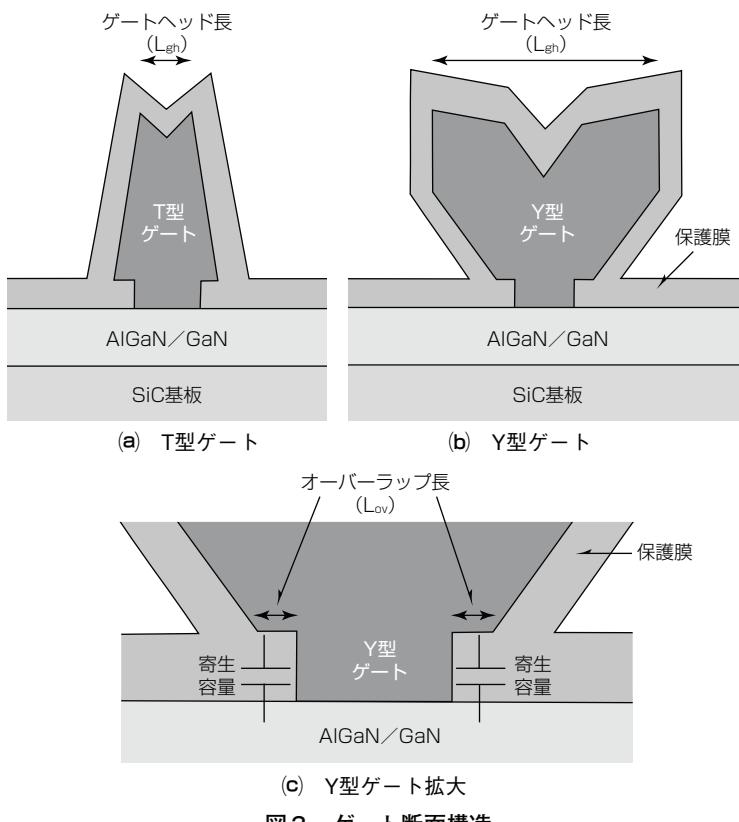


図3. ゲート断面構造

L<sub>ov</sub>を半減することで、C<sub>gs</sub>とC<sub>gd</sub>は従来比の約80%まで低減した(図5、図6)。この結果、最大安定利得(Maximum Stable Gain : MSG)は0.9dB向上した(図7)。

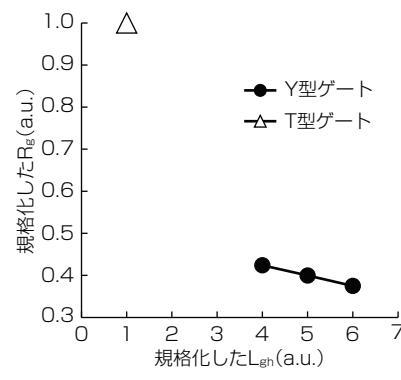


図4. R<sub>g</sub>比較

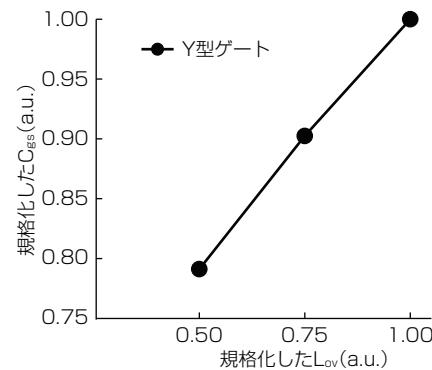


図5. C<sub>gs</sub>比較

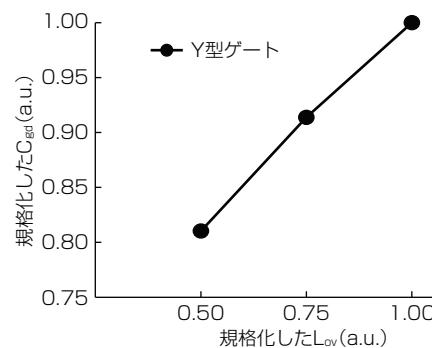


図6. C<sub>gd</sub>比較

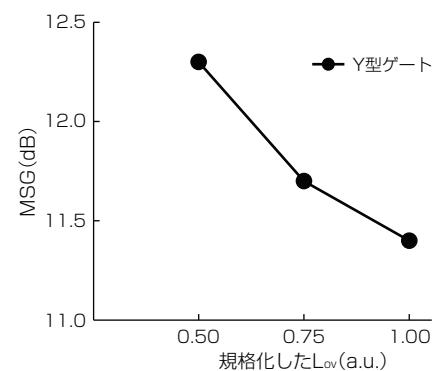


図7. MSG比較

### 3.3 ISV構造

図8にソース接続方式の異なる2種類の素子レイアウトを示す。図8(a)の2-Via HEMTは最外側のソースにビアホールパッドを設けた構造で、中央付近にあるソースはソースバスラインを介してビアホールに接地されるため、伝送線路による寄生成分 $L_s$ が加わる。 $L_s$ の増加は最大有能利得(Maximum Available Gain : MAG)を低下させるとともに、高周波特性の指標になるMSG/MAG変換点(fk)を低下させるため、高周波動作の妨げになっていた。

そこで、今回開発したGaN HEMTではソースバスラインを設けず、ソース直下にビアホールを形成するISV構造を採用した(図8(b))。ここで、ソース直下にあるビアホールのサイズが大きい場合には、各ソースの電極サイズを大きくしなければならず、チップサイズが必然的に大きくなる。また、各ゲートフィンガ間で入力電圧の位相差が大きくなり、利得が低下する。これらを考慮して、ソース直下の開口幅が10μm以下の微細ISVを形成するためのプロセス技術を確立した。図9にISV周辺部の断面STEM像を示す。ソースがISVを介して裏面メタルと接続できていることが分かる。

図10に小信号特性の比較結果を示す。2-Via HEMTの $L_s$ は5.5pHであり、fkは36.3GHzであった。一方、ISV HEMTでは、 $L_s$ は0pHになり、fkが41.7GHzまで向上し

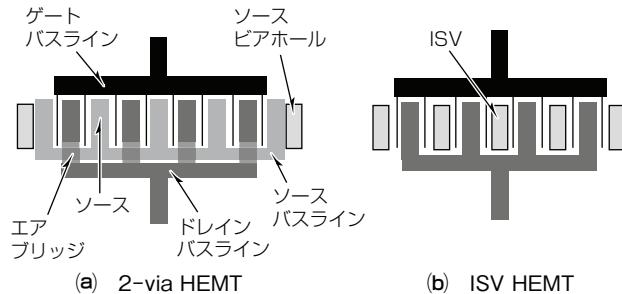


図8. 素子レイアウト

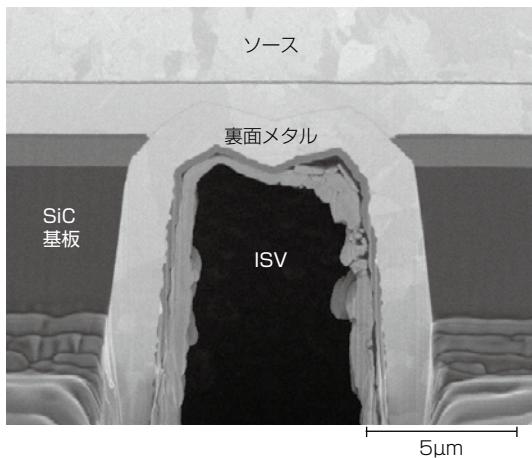


図9. ISV周辺部の断面STEM像

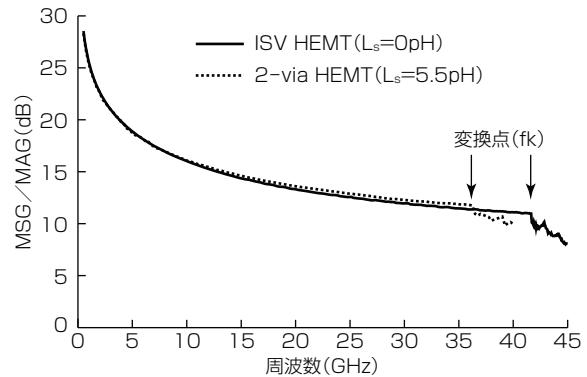


図10. 小信号特性の比較

た。これはこの素子がミリ波帯でも高利得に動作可能であることを示している。

### 4. 大信号特性の評価結果

最適化した素子構造に対して、PAEが最大になる大信号特性の測定条件を調査した。測定には整合回路付きの1セルトランジスタ(ユニットゲート幅 $W_{gu} = 52\mu\text{m} \times 8$ 本)を用いた。測定条件は $I_{dq} = 50\text{mA/mm}$ 、周波数 = 28GHz、CW(Continuous Wave)動作、効率整合とした。図11にPAEのドレイン電圧( $V_d$ )依存性を示す。PAEは $V_d$ 増加に伴って上昇し、 $V_d = 28\text{V}$ で最大になり、その後、僅かに下降した。これは $V_d$ 増加とともにゲート直下の空乏層がドレイン側に広がることで $C_{gd}$ が減少する一方で、電流コラプスの影響が大きくなり、 $R_{on}$ が低下するためである。一方、PDは $V_d$ とともに線形に増加した(図12)。

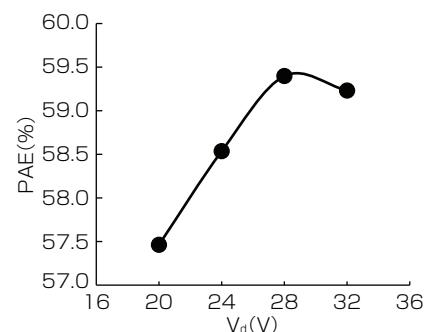


図11. PAEの $V_d$ 依存性

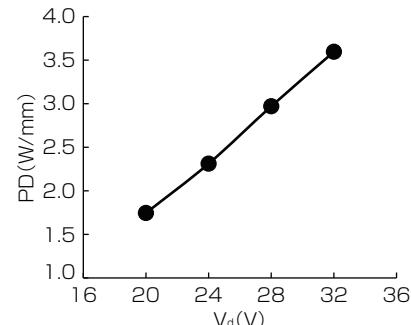


図12. PDの $V_d$ 依存性

続いて、アイドル電流( $I_{dq}$ )の最適化を行った。図13に示すとおり、 $I_{dq}$ を50mA/mmから絞っていくと、動作級がAB級からC級に近づくため、PAEが向上する。一方、入力電力に対する△利得の平坦(へいたん)性は $I_{dq} = 12.5\text{mA/mm}$ で大きく悪化したため、 $V_d = 28\text{V}$ ,  $I_{dq} = 25\text{mA/mm}$ の条件を選定した(図14)。

図15に測定条件最適化後の大信号特性(効率整合)を示す。PAEは入力電力20.4dBmのときに最大で60.3%,  $P_d$ は3.1W/mm, 利得は10.7dB, 出力電力は31.1dBm

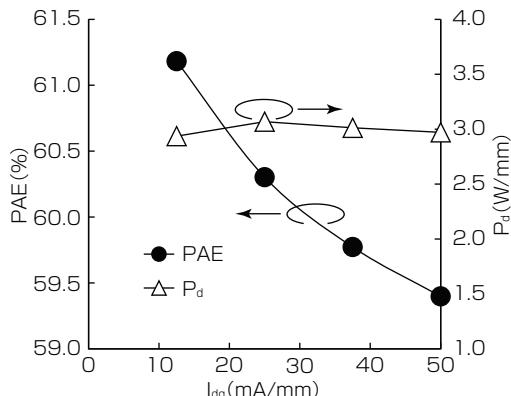
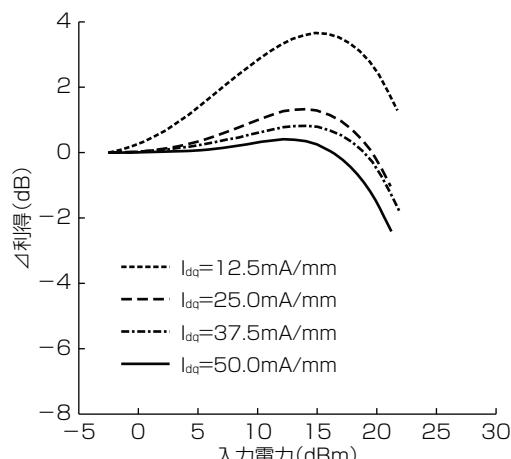
図13. PAEの $I_{dq}$ 依存性

図14. △利得の入力電力依存性

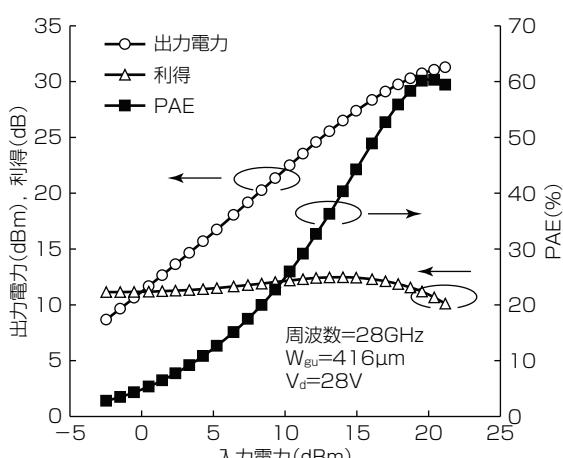


図15. 大信号特性(効率整合)

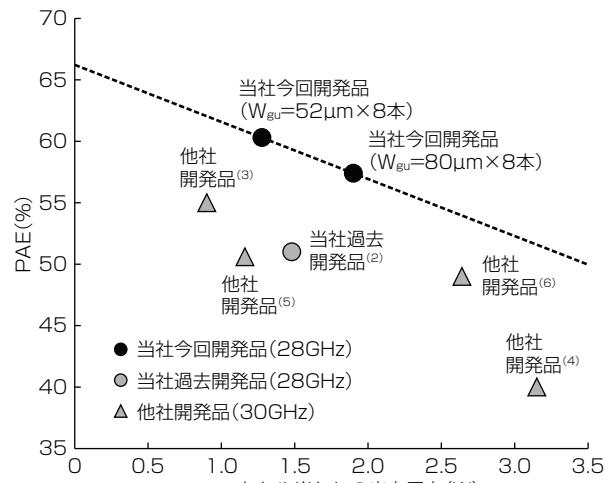


図16. 大信号特性の比較

(1.3W)であった。なお、出力電力整合条件下では、最大出力電力が33.8dBm(2.4W)まで増加し、 $P_d$ は5.8W/mm, PAEは50.1%であった。

図16にGaN HEMTのユニットセル当たりの出力電力とPAEの他社開発品との性能比較を示す<sup>(2)(3)(4)(5)(6)</sup>。当社が今回開発したKa帯高出力GaN HEMTが最も高いPAEを持っていることが分かる。

## 5. む す び

小信号等価回路モデルを用いてGaN HEMTの寄生成分を評価し、素子構造を最適化した。Siイオン注入技術を用いてコンタクト抵抗を含むオン抵抗を低減し、ゲート断面をY型にすることで低いゲート抵抗を保持したまま寄生ゲート容量を低減し、微細ISV構造によって寄生ソースインダクタンスを低減した。これらによって、Ka帯動作、ユニットセル当たり1W級を持つ高出力GaN HEMTで、60%を超えるPAEを達成した。開発したGaN HEMTをMMICに搭載することで、電力増幅器の高効率化が可能になった。

## 参 考 文 献

- 上野貴寛, ほか: GaAs-HEMTの高スループット生産に向けた短ゲート形成プロセス, 三菱電機技報, 93, No.3, 206~210 (2019)
- Yamaguchi, Y., et al.: A CW 20W Ka-band GaN high power MMIC amplifier with a gate pitch designed by using one-finger large signal models, IEEE CSICS, DOI : 10.1109/CSICS.2017.8240422 (2017)
- Estella, N., et al.: High-efficiency, Ka-band GaN power amplifiers, IEEE MTT-S IMS, 568~571 (2019)
- Roberg, M., et al.: 40W Ka-band single and dual output GaN MMIC power amplifiers on SiC, IEEE BCICTS, 140~143 (2018)
- Nayak, S., et al.: 0.15μm GaN MMIC Manufacturing Technology for 2~50 GHz Power Applications, CS MANTECH, 43~46 (2015)
- Din, S., et al.: High power and high efficiency Ka band power amplifier, IEEE MTT-S IMS, DOI : 10.1109/MWSYM.2015.7166776 (2015)

# Combo-PON向け 高出力10Gbps EML CAN

High Power 10Gbps EML CAN for Combo-PON

上土居 悠\*  
Yu Uwadai  
白崎昭生\*  
Akio Shirasaki  
柳楽 崇\*  
Takashi Nagira  
高木和久\*  
Kazuhide Takagi  
大和屋 武\*  
Takeshi Yamatoya

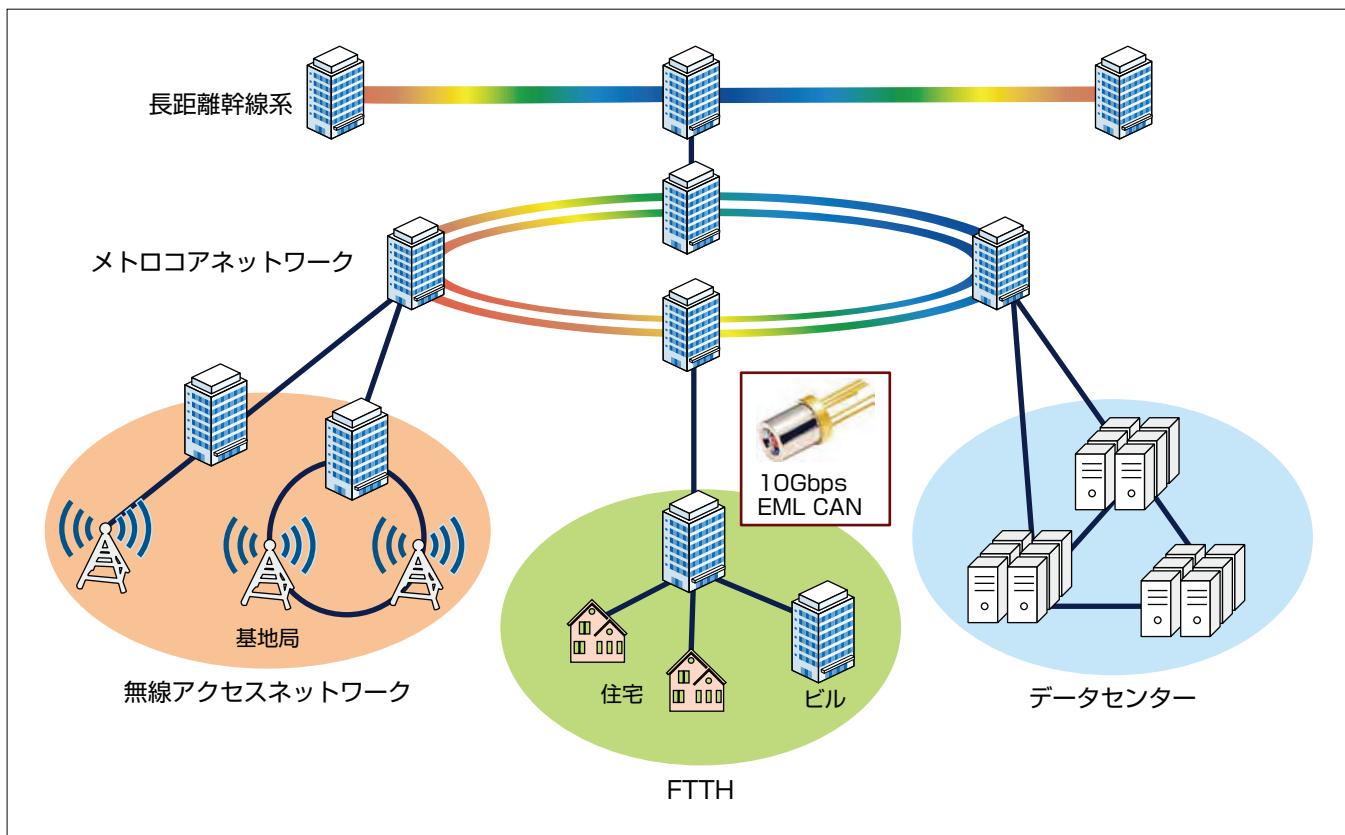
## 要旨

急速に増大するデータ通信量の需要に対応するため、FTTH(Fiber To The Home)システムでは、伝送速度を従来の10倍にする10G-EPON(10Gigabit-Ethernet Passive Optical Network)やXGS-PON(10Gigabit capable(Symmetric)-PON)へのアップグレードが進んでいる。その中で中国市場では既存G-PONとXGS-PONの互換性を持つCombo-PONの普及が進んでいる。Combo-PON向け光トランシーバでは10Gbps用の光源として期待されるCAN型EML(Electro-absorption Modulated Laser)の高出力化が求められている。

今回光出力を向上させるためにEML素子の構造を抜本的に見直した。EML素子の構造はリッジ型から埋め込み型へ変更し、LD(Laser Diode)の活性層への電流注入効率を改

善しつつ電流注入経路での発熱を有効に放熱できるようにすることで、光出力は1.2dB向上した。その結果、目標仕様であるCombo-PON(D1)規格11dBmを満たす11.7dBmの光出力を得た。また、EA(Electro-Absorption)変調器の構造もLD部の構造と同様に従来のリッジ型から埋め込み型に変更することで、導波モード整合を満たしつつ出射ビームを34度から27度に狭角化し、ファイバ結合効率を0.8dB改善した。一方、LD部と同構造の電流ブロック層をEA変調器にも適用したことで静電容量の増大、それに伴う周波数特性の悪化が発生したが、EA変調器をより低容量な埋め込み型構造にすることで解消した。

このEMLをCAN型パッケージに搭載し、消光比10dB、マスクマージン25%の良好な特性を得た。



## EML

EMLは電界吸収型光変調器と分布帰還形レーザが集積された半導体レーザーの一種である。分布帰還形レーザと比較して高速動作と長距離伝送に優れるため、25Gbps以上の高速動作が求められる送信光源や10Gbpsの長距離伝送用として採用されている。

## 1. まえがき

急速に増大するデータ通信量の需要に対応するため、FTTHシステムでは、伝送速度を従来の10倍にする10Gbpsクラスのシステム(10G-EPON, XG-PON(下り10Gbpsに対して上りは1Gbps), XGS-PON(上りも下りも10Gbps))へのアップグレードが進んでいる。PONシステムは図1に示すように局舎用装置(Optical Line Terminal: OLT)につながる1本の光ファイバを光カプラで分岐し、複数の加入者宅用装置(Optical Network Unit: ONU)につなげるものであるが、例えば加入者宅側にG-PONとXGS-PONの両方が存在する場合、両者をサポートできるような構成にする必要がある。しかし、XGS-PONのOLTに用いられる光トランシーバの構成は、図2(a)に示すように10Gbpsに対応したEML(図3)とAPD(Avalanche Photo Diode)だけを搭載した構成になっているため、G-PONとXGS-PONの共存を図るために光トランシーバの外部で多重化する必要があり、コスト高になる。そのため、中国市場を中心にして、既存のG-PONとXGS-PONとの互換性を持つ光トランシーバを用いたCombo-PONの普及が進んでいる。図2(b)に示すCombo-PON向け光トランシーバでは、光トランシーバ内部でG-PON/XGS-PONの多重化を行っているため、既存のG-PONとの互換性があり導入が容易になる。

Combo-PON向け光トランシーバに関しては、図2(b)に示すように図2(a)と比較して内部の光学系が複雑になるため、光学損失が増大する。そのため10Gbps用の光源として期待されるCAN型EMLで高出力化が求められている。そこで今回、EML素子の設計を抜本的に見直し、光出力の高出力化とビーム角度の狭角化による結合効率の改善を行った。

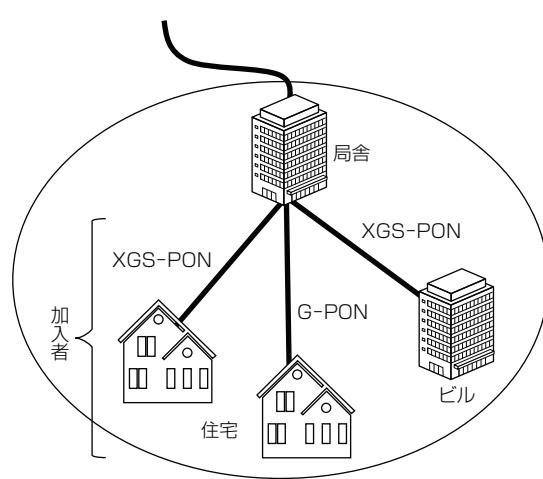


図1. PONシステム構成

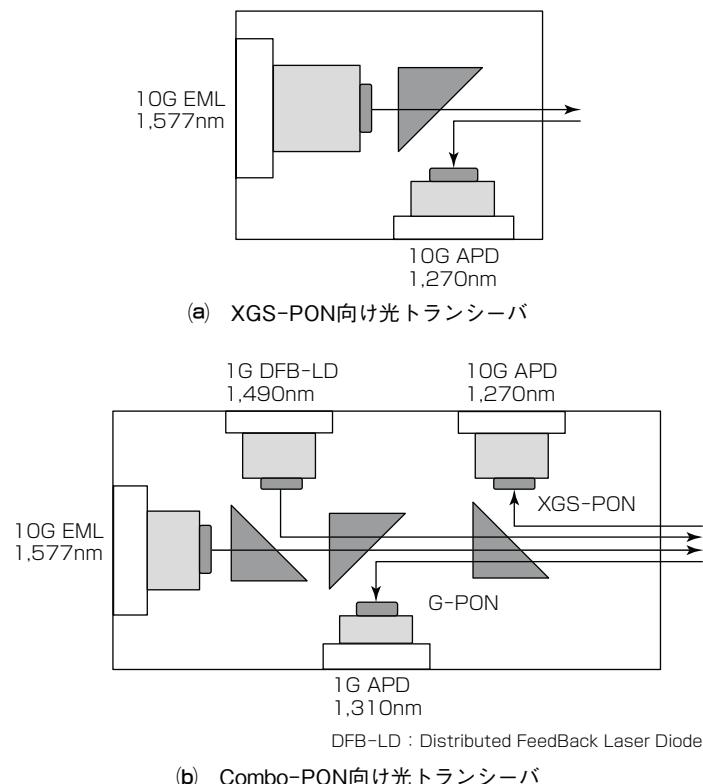


図2. XGS-PONとCombo-PON向け光トランシーバの概念図



図3. 10Gbps EML CAN

## 2. EML素子の設計

### 2.1 素子構造変更による高出力化

10G-EPON等に用いられる従来のリッジ型構造のEML素子(図4(a)(b))では、Combo-PONで求められる高光出力、高結合効率、低消費電力の要求を満たすことができないため、これらの要求を高い歩留りで満たすことができる新たなEML素子を開発し、その素子をCAN型パッケージに搭載したEML CANを製品化した。従来のリッジ型EML素子を搭載したEML CANでサポートする10G-EPON(PR30)規格、XG-PON(N1)規格に対して、新たなEML CANがターゲットとするCombo-PON(D1)規格では、レンズから出射される光出力(PL)に換算すると、

9.5dBmから11dBmへの光出力向上が必要になる。その要求を満たすため、従来EML素子の構造を、リッジ型から埋め込み型(図4(c)(d))に見直した。LD活性層の周りをInP(リン化インジウム)で埋め込んで電流ブロック層を形成することで、LD活性層への電流注入効率を改善しつつ、電流注入経路での発熱を有効に放熱できるような構造にすることで、光出力効率の向上を図っている。典型的な駆動条件であるLD駆動電流( $I_{op}$ )109mAで、1.2dBの光出力向上を実現して11.7dBmの光出力を達成した(図5)。

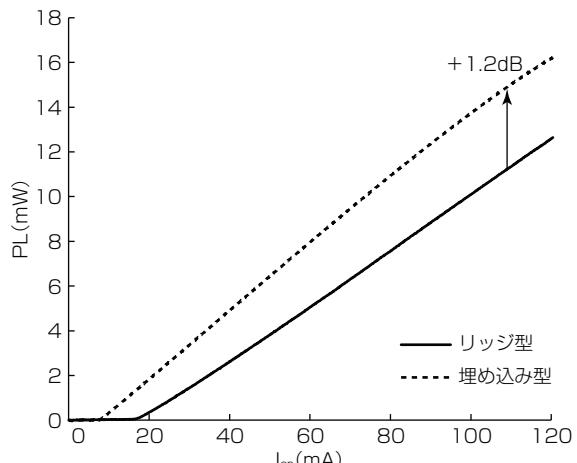
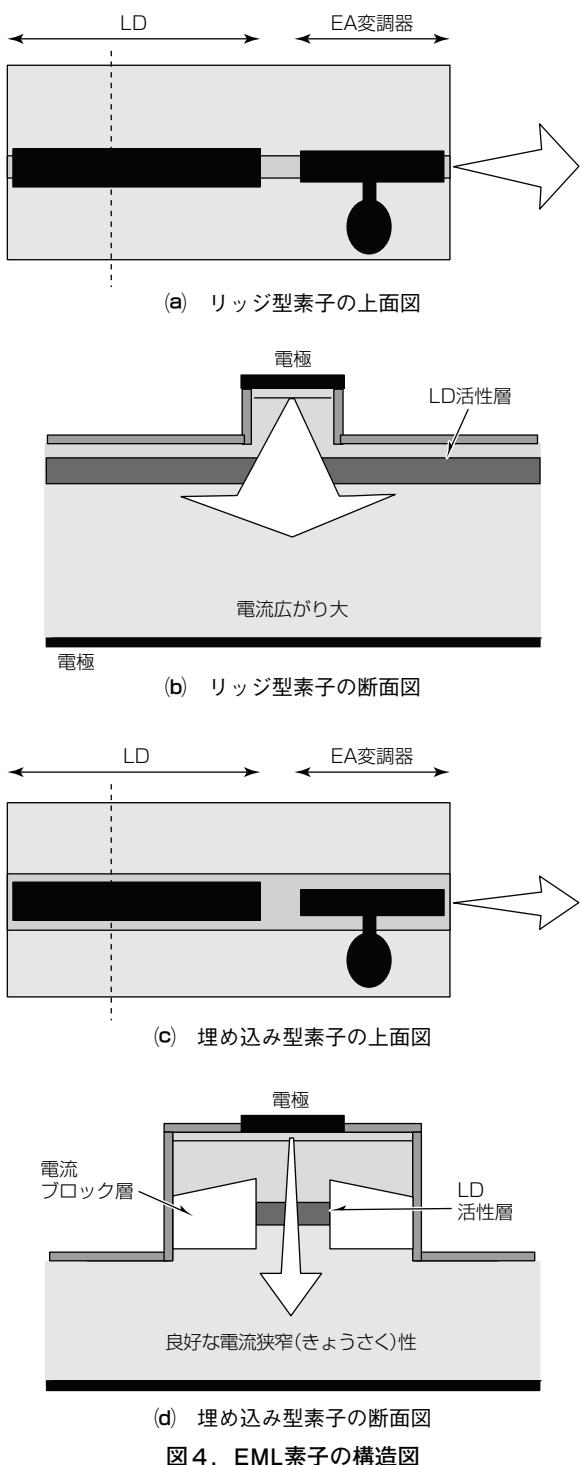


図5. EML素子の光出力

## 2.2 素子構造変更によるビーム狭角化

出射ビーム形状は光源であるLDから光出射側に当たるEA変調器への導波モードの整合度及びEA変調器の導波モード形状で決まるため、EA変調器の構造もLD部の構造と同様に従来のリッジ型から埋め込み型に変更することで導波モード整合を満たしつつ<sup>(1)</sup>、出射ビームを狭角化するように最適化した。これによって、LD／EAの導波モード不整合によって生じる垂直方向ビーム形状のリップルが低減し、またEA変調器の導波モード径を大きくすることで、遠方でのビーム出射角は半值全角でリッジ型の34°から27°に狭角化した(図6)。その結果シングルモードファイバへの結合効率はリッジ型の59%から71%になり、光トランシーバの出力では0.8dBの改善につながる。

## 2.3 高周波特性の安定化

埋め込み型構造の適用によるレンズ後光出力向上の一方で、開発時の課題として、LDとEA変調器部とを共通の電流ブロック層で埋め込んだ構造にした場合に、光出力波形不良(帯域不足)が見られることが判明した(図7(a))。光信号の品質を表すマスクマージン(MM)は、光出力波形不良素子では-20%以下であった。

この光出力波形不良の要因として、LD部と同構造の電流ブロック層をEA変調器にも適用したために、静電容量が増大し、周波数応答特性の悪化を引き起こしているものと推定した<sup>(2)</sup>。対策として、EA変調器の埋め込み層をより低容量な構造にすることを検討した。ただし、EA変調器の埋め込み層の構造変更に際しては、LDとEA変調器の導波モードを整合させた上で容量を低減する必要がある。これらの条件を満たすように、EA変調器の埋め込み構造はLDの埋め込み構造から電流ブロック層の一部を除去する構造にした上で(図8)、所望のブロック層構造を実現する

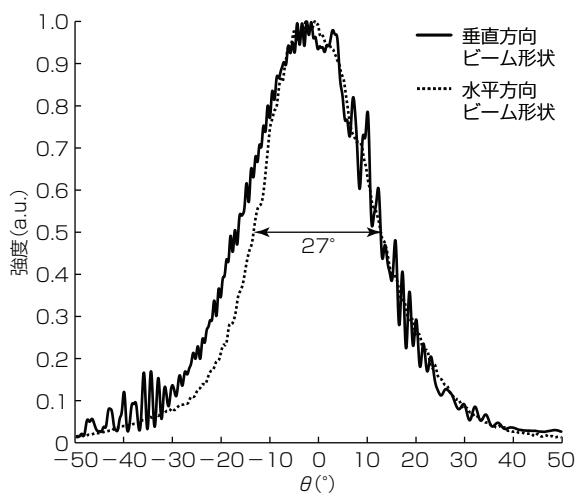
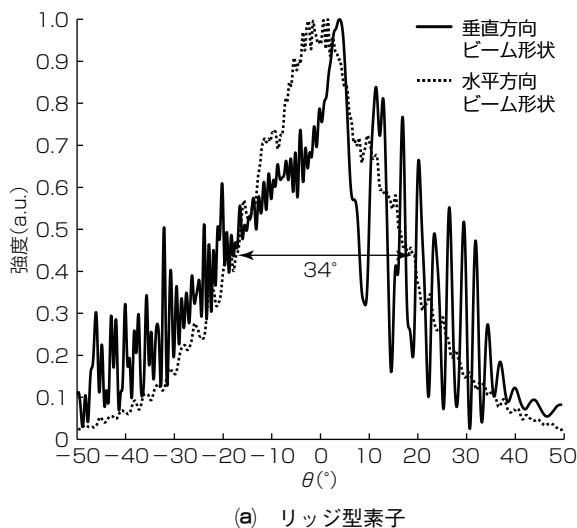


図6. 出射ビーム形状

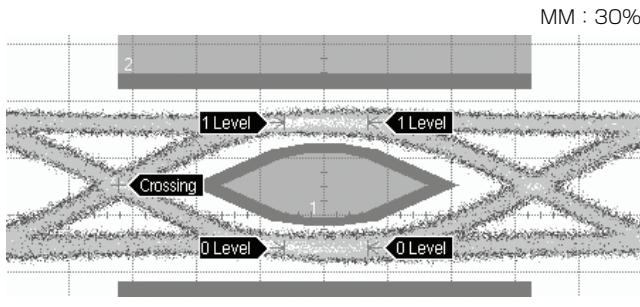
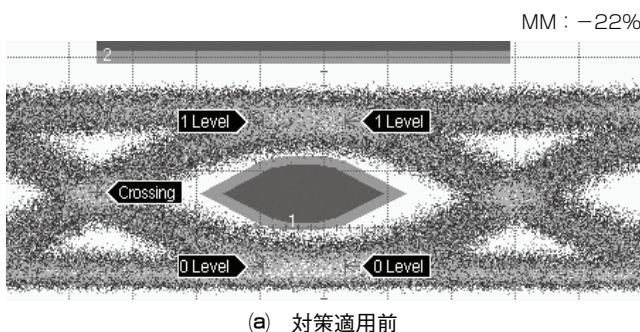


図7. 10.3Gbps動作時の光出力波形

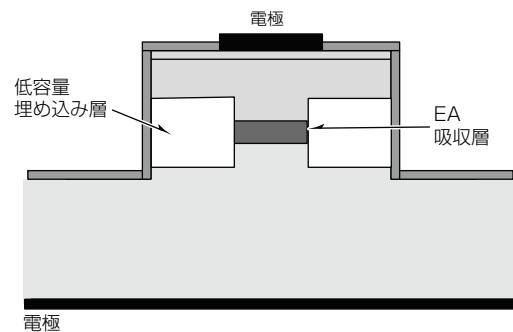
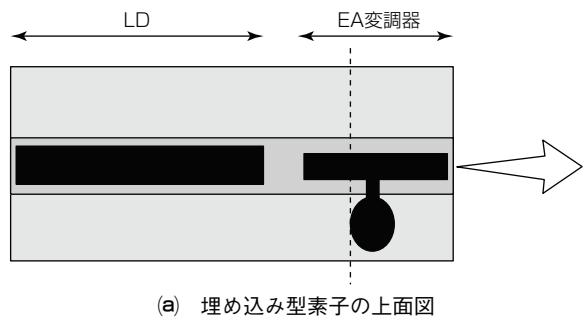


図8. EA変調器の構造図

製造フローを確立した。その結果、埋め込み層の低容量化によって光出力波形不良を解消し(図7(b))、MMは+30%以上を安定的に得ることができた。さらに、LD/EAの導波モード不整合がある場合に生じる垂直方向ビーム形状のリップルは十分に抑制されており(図6(b))、LDとEAの導波モード整合条件を満たしていることも確認できた。

この低容量埋め込み層をEA変調器に適用することによって、適用前の電気-光通過特性(S21)の3 dB帯域が10GHz程度であったのに対し、適用後には3 dB帯域は従来のリッジ型EA変調器を上回る23GHz程度まで向上し、10Gbps変調で十分な高周波応答特性を得ることができた。

### 3. EML CANの評価結果

2章で述べたように設計したEML素子をCAN型パッケージに搭載し、周波数応答特性と光出力波形の評価を行った。図9に周波数応答特性の評価結果を示す。通過特性の3 dB帯域は9GHzであり、従来のリッジ型構造素子を搭載したものと同等であった。また、図10にBTB(Back To Back)の光出力波形を示す。駆動条件はビットレート10.3Gbps、ケース温度( $T_c$ )=25°C、EMLの設定温度( $T_{ld}$ )は45°C、LD駆動電流( $I_{op}$ )は109mA、EMLの変調電圧振幅( $V_{pp}$ )は2V、EAオフセット電圧( $V_{off}$ )は-0.6Vである。評価にはCAN型パッケージにFPC(Flexible Printed Circuit)を接続して行った。評価の結果、消光比10dB、マスクマージン25%の良好な光出力波形を得た。

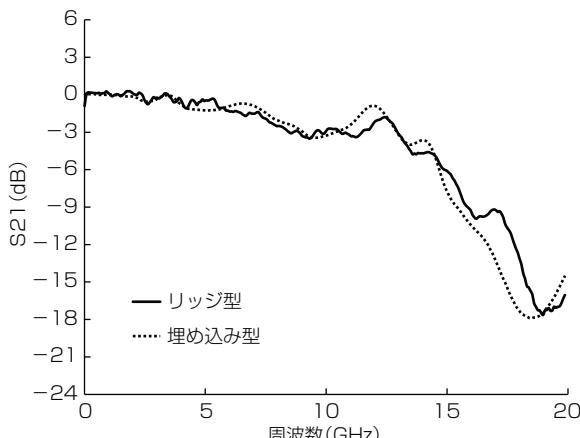


図9. 周波数応答特性の評価結果

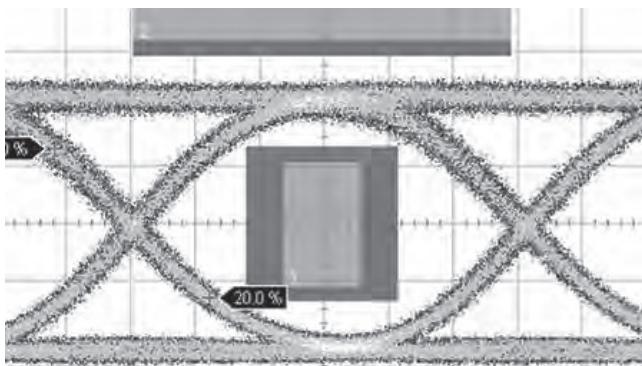


図10. 10.3Gbps動作時の光出力波形

#### 4. む す び

Combo-PON向け高出力10Gbps EML CANを開発するため、EML素子の設計を抜本的に見直した。EML素子の構造はリッジ型から埋め込み型へ変更し、LD活性層への電流注入効率を改善しつつ電流注入経路での発熱を有効に放熱できるようにした。その結果光出力は1.2dB向上し、Combo-PON(D1) 規格11dBmを満たす11.7dBmを達成した。また、EA変調器の構造もLD部の構造と同様に従来のリッジ型から埋め込み型に変更することで、導波モード整合を満たしつつ出射ビームを34°から27°に狭角化し、ファイバ結合効率を0.8dB改善した。一方、LD部と同構造の電流ブロック層をEA変調器にも適用したことで静電容量の増大、それに伴う周波数特性の悪化が発生したが、EA変調器をより低容量な埋め込み型構造にすることで解消した。

このEML素子をCAN型パッケージに搭載し、通過特性がリッジ型と同等であることを確認した。また消光比10dB、マスクマージン25%の良好な光出力波形を得た。

#### 参 考 文 献

- (1) Asbeck, P. M. et al.: Lateral mode behavior in narrow stripe lasers, IEEE Journal of Quantum Electronics, **15**, No.8, 727~733 (1979)
- (2) Zhu, N. H., et al.: Electrical and Optical Coupling in an Electroabsorption Modulator Integrated with a DFB Laser, IEEE Journal of Quantum Electronics, **43**, No.7, 535~544 (2007)

# 第5世代移動通信システム基地局用 50Gbps EML CAN

50Gbps EML CAN for 5G Base Stations

渡辺洋次郎\*  
Yojiro Watanabe

中村誠希†  
Seiki Nakamura

福島颯太\*  
Hayata Fukushima

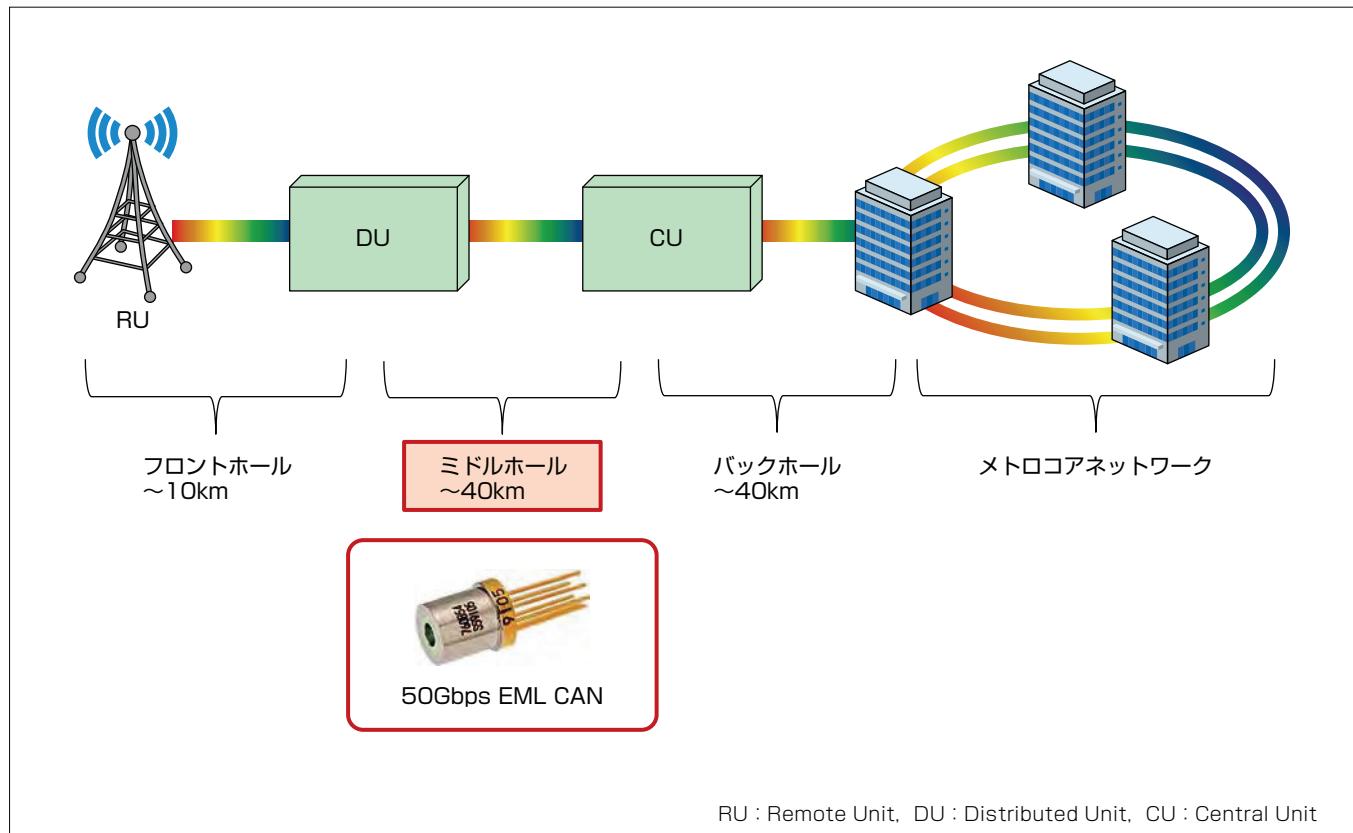
那須雅樹\*  
Masaki Nasu

## 要旨

急速に増大しているデータ通信量の需要に対応するため、第5世代移動通信システム(5G)の普及が広がっている。トラフィックが集中する5G基地局には大容量光通信システムが適用され、5G基地局ネットワークのミドルホールに適用する伝送速度50Gbpsの光デバイスとして26Gbaudの4値パルス変調(Pulse Amplitude Modulation-4 : PAM4)で動作する電界吸収型変調器集積レーザ(Electro-absorption Modulated Laser : EML)が求められている。

26Gbaud PAM4で動作するEML製品としては、セラミックと金属が一体になったBOX型パッケージを適用した製品が一般的である。今回、25Gbps EML CAN<sup>(1)</sup>のFPC

(Flexible Printed Circuit)上の伝送線路と駆動条件を最適化して、26Gbaud PAM4動作で消光比7.0dB、TDECQ (Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary) 2.0dBを得た。ペルチェ効果を利用した熱電変換素子の消費電力は、ケース温度+80°Cでは0.19W、-5°Cでは0.20Wであり、BOX型パッケージの0.26Wに比べて23%低くできた。C-temp(-5 ~ +80°C)で動作可能な、5G基地局ネットワークのミドルホール対応の標準規格50GBASE-ER (26Gbaud PAM4 40km伝送)に適合する特性(消光比 $\geq$ 6dB、TDECQ $\leq$ 3.2dB)を低コストで低消費電力のCAN型パッケージで実現した。



## 5G基地局ネットワークのミドルホールに適用する50Gbps EML CAN

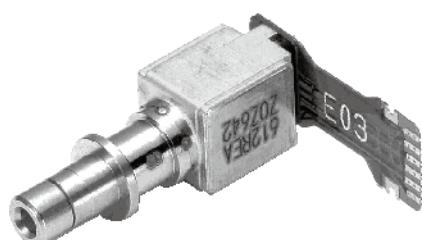
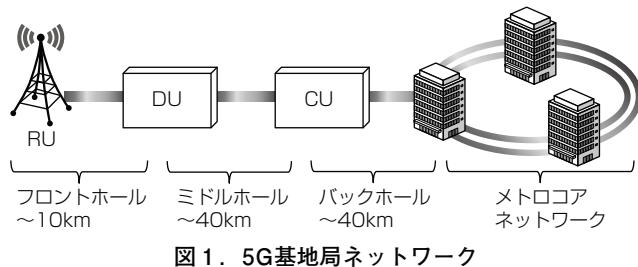
EMLは電界吸収(Electron-Absorption : EA)型光変調器と分布帰還形レーザが集積された半導体レーザーの一種である。分布帰還形レーザーと比較して高速動作と長距離伝送に優れるため、25Gbps以上 の高速動作が求められる送信光源や10Gbpsの長距離伝送用として採用されている。5G基地局ネットワークのミドルホールに適用する伝送速度50Gbpsの光デバイスとして、26Gbaud PAM4で動作する50Gbps EML CANを実現した。

## 1. まえがき

急速に増大するデータ通信量の需要に対応するために、2020年から5Gのサービス提供が普及し始めている。5Gへの移行に伴い、5G基地局ネットワークの光通信市場が活況になっており、トライフィックが集中する5G基地局には大容量通信システムが適用され、各階層に適用される光デバイスも高速化されている。図1に、光デバイスが適用される5G基地局ネットワークを示す。ミドルホールでは伝送速度50Gbpsの光デバイスが適用され、伝送距離は40kmである。

伝送速度50Gbpsの実現方法としては、セラミックと金属が一体になったBOX型パッケージ(図2(a))にEML素子を搭載して、26Gbaud PAM4動作をさせることが一般的である。CAN型パッケージ(図2(b))を適用する場合、インピーダンス不整合による帯域制限が発生し、26Gbaud PAM4動作に十分な帯域を得ることが難しい。

今回、25Gbps EML CAN<sup>(1)</sup>のFPC(Flexible Printed Circuit)上の伝送線路と駆動条件を最適化して、26Gbaud PAM4動作で消光比7.0dB, TDECQ 2.0dBを得た。熱電変換素子の消費電力は、ケース温度+80°Cでは0.19W, -5°Cでは0.20Wであり、BOX型パッケージの0.26Wに比べて



(a) BOX型EML TOSA



(b) 26Gbaud PAM4 EML CAN

TOSA : Transmitter Optical Sub-Assembly

図2. BOX型パッケージとCAN型パッケージ適用のEML

23%低くできた。C-temp(-5 ~ +80°C)で動作可能な、5G基地局ネットワークのミドルホール対応の標準規格50GBASE-ERに適合する特性(消光比 $\geq 6$  dB, TDECQ  $\leq 3.2$ dB)を低成本で低消費電力のCAN型パッケージで実現した。

## 2. パッケージの外形

50Gbps EML CANのCAN型パッケージの外形寸法は業界標準のΦ5.6mmである。図3にパッケージの外形図を、図4にピン配置を示す。EMLは温度変化による特性変動が大きいため、熱電変換素子と、EML近傍の温度を検知するサーミスタを使ってEMLの温度を一定に制御する必要がある。また、LD(Laser Diode)駆動電流を一定に制御するため、背面光出力をモニタするPD(Photo Diode)も内蔵している。レンズ形状は一般的な円筒形状になっており、図5のようにTOSAにすることが容易な構成になっている。

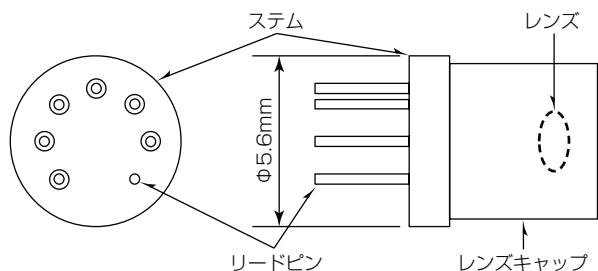


図3. パッケージの外形図

No.	機能
1	EMLアノード
2	PDアノード
3	クーラーアノード
4	クーラーカソード
5	LDアノード
6	サーミスタ
7	グラウンド

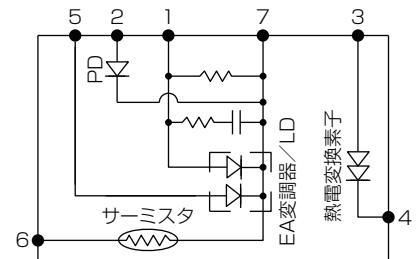


図4. ピン配置

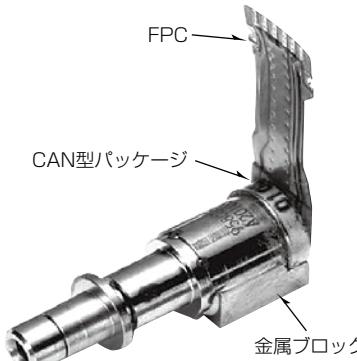


図5. CAN型EML TOSA<sup>(2)</sup>

### 3. EMLの素子構造

図6にEMLの素子構造を示す。レーザ部は効率・高温動作に優れる埋め込み型にし、EA変調器部は低変調電圧と高速動作を両立させるため、長尺化と、図6(c)のように吸収層の狭幅化を行った。吸収層を狭幅化すると光閉じ込め係数が低下するが、ハイメサ型にすることによって高い光閉じ込め係数を維持している<sup>(3)</sup>。このようにレーザ部とEA変調器部を異なる導波路構造にすることによって両者の特性を引き出している。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。

### 4. FPC上の伝送線路のインピーダンスと周波数特性

CAN型パッケージの帯域悪化はEMLを駆動するドライバICとEML素子間のインピーダンス不整合に起因する。特にシステムガラス貫通部とEML素子間で発生する電気的多重反射で帯域悪化が発生しやすいため、25Gbps EML

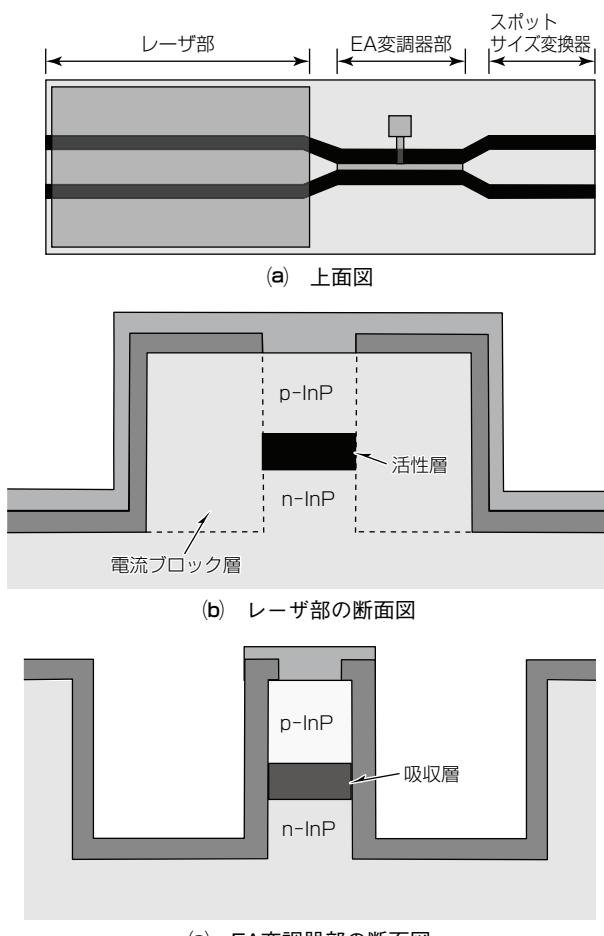


図6. EMLの素子構造図

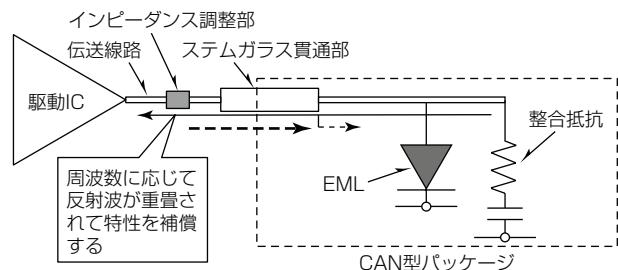


図7. インピーダンス調整部による周波数応答特性の補償

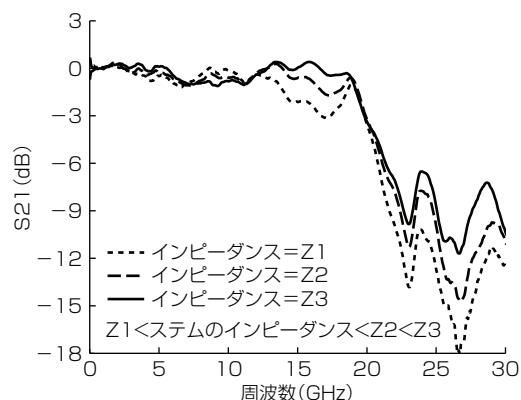


図8. 周波数応答特性のインピーダンス依存性

CANでは、CANパッケージ内部の伝送線路も含めたインピーダンス整合を改善することで帯域改善を図った<sup>(1)</sup>。今回、システムガラス貫通部のインピーダンス不整合に合わせて、反射波で利得の凹凸を補償するようにFPC上の伝送線路の一部のインピーダンスを調整した。図7に概念図を示す。インピーダンス調整部で、周波数に応じて反射波が重畠されるため、周波数応答特性を補償する効果がある。図8に、FPC上の伝送線路で、同一部分のインピーダンス値を変化させたときの周波数応答特性を示す。インピーダンス調整部を設けることによって、周波数応答特性を平滑化できることを確認した。

### 5. 評価結果

4章の結果を基に、FPC上の伝送線路を最適化した。図9に、FPC等の伝送線路も含めた50Gbps EML CANの周波数応答特性の評価結果を示す。周波数応答特性の3dBカットオフ周波数は19.4GHzであった。図10に、BTB(Back To Back)の光波形を示す。駆動条件はボーレート26Gbaud, 変調方式PAM4, ケース温度( $T_c$ )25°C, EMLの設定温度( $T_{ld}$ )50°C, LD駆動電流( $I_{op}$ )100mA, EML変調電圧振幅( $V_{pp}$ )1.3V, EAオフセット電圧( $V_{off}$ ) -1.5Vである。評価の結果、消光比7.0dB, TDECQ 2.0dBであり、5G基地局のミドルホール対応の標準規格50GBASE-ERに適合する特性(消光比 $\geq 6$  dB, TDECQ $\leq 3.2$ dB)を低コストな

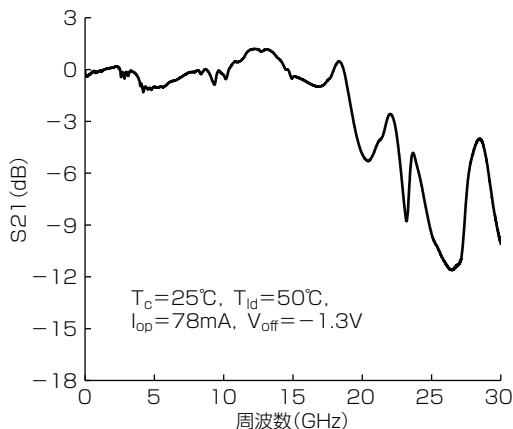


図9. 50Gbps EML CANの周波数特性の評価結果

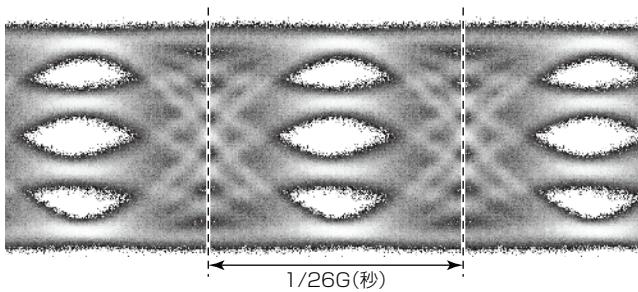


図10. 26Gbaud PAM4動作時の光波形

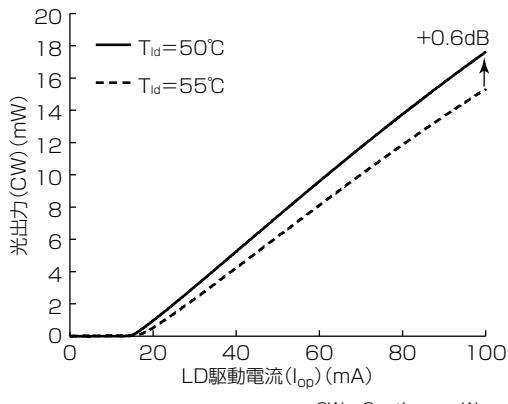


図11. Tld50°Cと55°Cのときの光出力特性

CAN型パッケージで実現した。

また、フロントホール向けに開発した25Gbps EML CAN<sup>(1)</sup>では、使用環境温度がI-temp(-40~+95°C)のため、熱電変換素子の消費電力を考慮してEMLの設定温度( $T_{ld}$ )を55°Cにした。今回のミドルホール向けでは、使用環境温度はC-temp(-5~+80°C)であるため、EMLの高出力化のために $T_{ld}$ を低くしても、熱電変換素子の消費電力を低く保つことができる。そこで、ケース温度が-5°Cと+80°Cで消費電力が同じ程度になるように、50Gbps EML CANの $T_{ld}$ は50°Cにした。図11に、 $T_{ld}$ 50°Cと55°Cのときの光出力特性を示す。駆動電流( $I_{op}$ )100mAのときで、50°Cにする

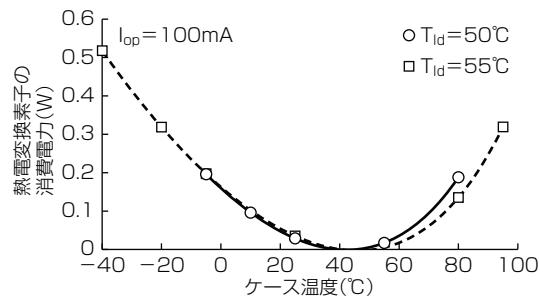


図12. 热電変換素子の消費電力の評価結果

表1. 50Gbps EML CANの目標仕様と評価結果

項目	目標仕様	評価結果
発振波長	1,304.5~1,317.5nm	1,309.0nm
光出力(CW)@ $I_{op}$ =100mA	$\geq 10.9\text{dBm}$	12.3dBm
3dBカットオフ周波数	—	19.4GHz
消光比	$\geq 6.0\text{dB}$	7.0dB
TDECQ	$\leq 3.2\text{dB}$	2.0dB
熱電変換素子の消費電力	$\leq 0.70\text{W}@-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\leq 0.42\text{W}@+80\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 0.20\text{W}@-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\leq 0.19\text{W}@+80\text{ }^{\circ}\text{C}$

ことによって光出力を+0.6dB高めることができる。また、図12に、ケース温度を-5°Cから+80°Cに変化させたときの熱電変換素子の消費電力を示す。比較のために、 $T_{ld}$ 55°Cで動作させたときの消費電力も併せて示す。熱電変換素子の消費電力は、ケース温度+80°Cでは0.19W、-5°Cでは0.20Wであり、C-temp(-5~+80°C)での動作が可能である。

表1に50Gbps EML CANの目標仕様と評価結果を示す。

## 6. む す び

5G基地局ネットワークのミドルホール向けに25Gbps EML CAN<sup>(1)</sup>のFPC上の伝送線路を最適化して周波数応答特性を平滑化して、さらに駆動条件についても最適化して高出力化を図り、26Gbaud PAM4で動作する50Gbps EML CANを実現した。光波形の評価を実施して、BTBで消光比7.0dB、TDECQ 2.0dBの良好な光波形を得ることができ、5G基地局のミドルホール対応の標準規格50GBASE-ER(26Gbaud PAM4 40km伝送)に適合する特性(消光比 $\geq 6\text{ dB}$ 、TDECQ $\leq 3.2\text{dB}$ )を低コストなCAN型パッケージで実現した。熱電変換素子の消費電力は、ケース温度+80°Cでは0.19W、-5°Cでは0.20Wであり、C-temp(-5~+80°C)での動作が可能である。

## 参 考 文 献

- (1) 渡辺洋次郎、ほか：第5世代移動通信基地局向け25Gbps CAN型EML、三菱電機技報、93、No.3、167~171 (2019)
- (2) 大谷龍輝、ほか：80km伝送用低消費電力CAN型10Gbps EML-TOSA、三菱電機技報、89、No.5、303~306 (2015)
- (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 100Gbps EML CAN

100Gbps EML CAN for 5G Base Stations

中野誠二\*

Seiji Nakano

藤原諒太†

Ryota Fujihara

那須雅樹\*

Masaki Nasu

奥田真也\*

Shinya Okuda

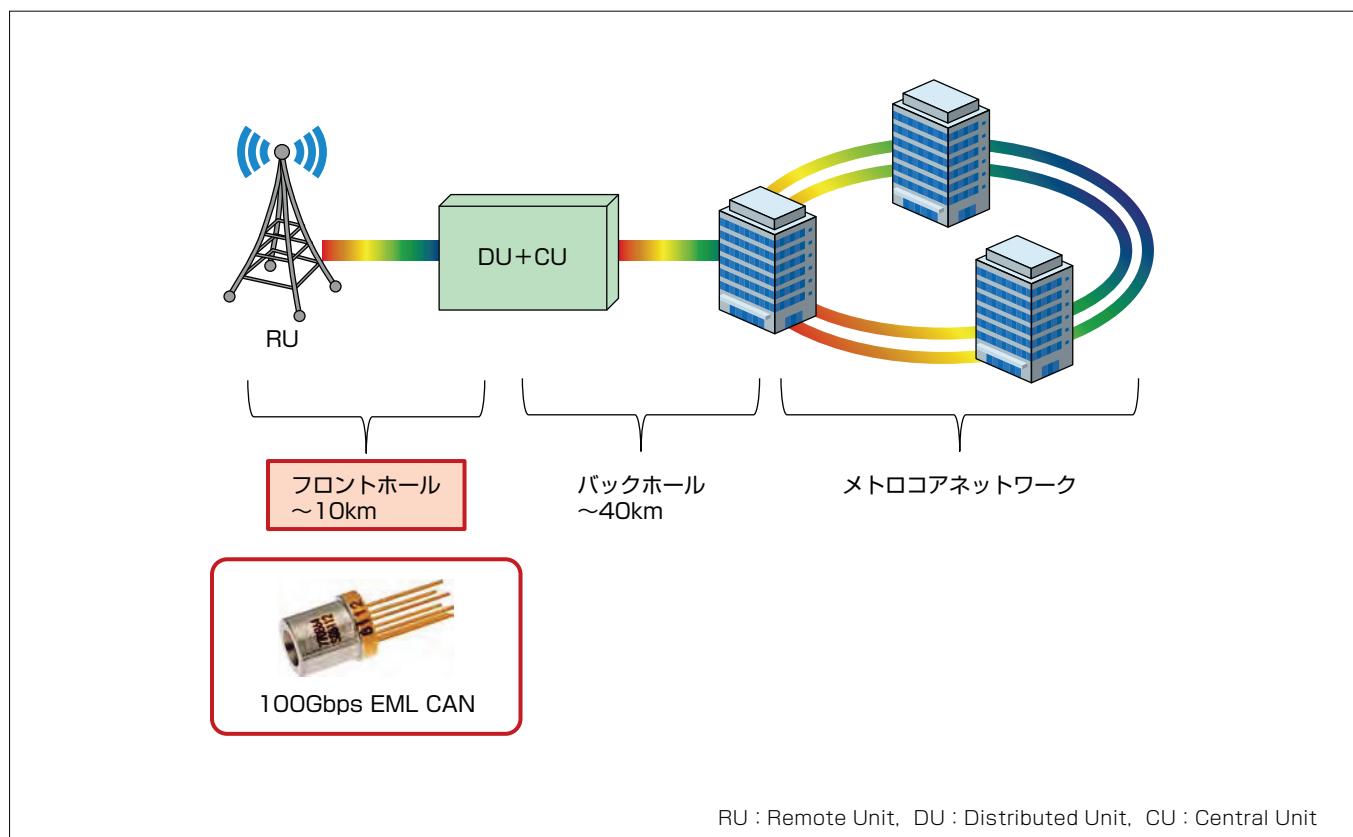
## 要旨

携帯通信端末の普及や情報のクラウド化によるデータ通信量の急増を背景に、移動通信システムは世界各国で第4世代(4G)から第5世代(5G)への移行が進んでいる。これに伴い、基幹ネットワークと基地局間にも大容量の光通信システムが必要とされている。

今回、三菱電機は2018年に製品化した25Gbpsで動作するEML(Electro-absorption Modulated Laser)CAN<sup>(1)</sup>と同じ外径Φ5.6mmのTO(Transistor Outline)-CANパッケージを用いて、4倍の通信速度に対応可能な100Gbps EML CANを開発した。

通信速度の向上には信号通過帯域の拡大が課題であったが、EMLの微細構造の改良と併せて、パッケージ構造の信

号線路のインピーダンスを最適化することで、-3dB通過帯域を従来製品の19GHzから36GHzまで拡大した。さらに、一つのパルス信号に2ビットの情報を載せるPAM4変調方式(Pulse Amplitude Modulation-4)に対応することで通信速度の4倍化を実現した。また、EML素子を一定温度に制御するための熱電変換素子の小型化によって、屋外設置の基地局用途で必要とされる-40~+95°Cの広い温度範囲での動作を保証しつつ、従来製品25Gbps EML CANと同じ熱電変換素子を適用することによって、1Gbps当たりの消費電力は4分の1に低減でき、光通信システムの省電力化にも大きく貢献する。



## 5G基地局ネットワークのフロントホールに適用する100Gbps EML CAN

EMLは分布帰還形レーザ(レーザ部)と電界吸収(Electro-Absorption : 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。広帯域化をするためにはEA変調器長を短尺化して素子容量低減をする必要があるが、EA変調器を短尺化すると消光比が小さくなるというトレードオフ関係があるため、最適化が必要である。5G基地局ネットワークのフロントホールに適用する通信速度100Gbpsの光デバイスとして、100Gbps EML CANを開発した。

## 1. まえがき

携帯通信端末の普及や情報のクラウド化によるデータ通信量の急増を背景に、移動通信システムは世界各国で第4世代(4G)から第5世代(5G)への移行が進んでいる。これに伴い、基幹ネットワークと基地局間にも大容量の光通信システムが必要とされている。5G基地局のネットワークアーキテクチャは図1に示すような構成であり、これまでフロントホールには25Gbpsで動作するEML CANが適用されていたが、通信量の増大によって100Gbpsで動作する製品が求められている。

25Gbps EML CANの構造は、インピーダンス不整合による高周波信号の反射点が多いため、100Gbpsの高速動作に必要な信号通過帯域の確保が困難であった<sup>(2)</sup>。

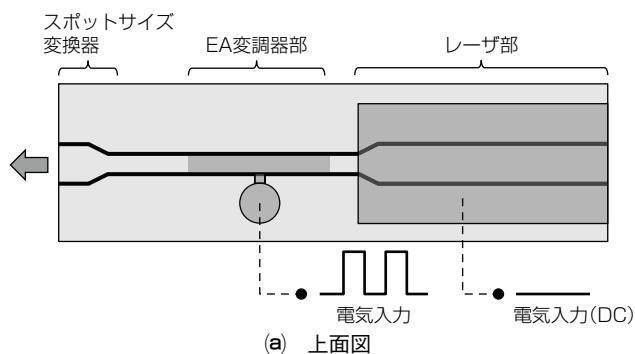
そこで今回、EML素子の広帯域化とともに、パッケージ構造のインピーダンス不整合箇所を見直し、かつパッケージとFPC(Flexible Printed Circuits)の間に金属製プレートを導入することによって信号反射の抑制が可能になり、信号通過帯域を拡大する新しい構造を考案した。また、外形は図2に示すように従来製品の25Gbps EML CANと同一にし、かつ25Gbps EML CANの部材を流用してコストを抑えつつ、一つのパルス信号に2ビットの情報を載せるPAM4変調方式に対応することで、4倍の通信速度である100Gbpsの光信号送信デバイスを実現した。

さらに、EML素子を一定温度に制御するための熱電変

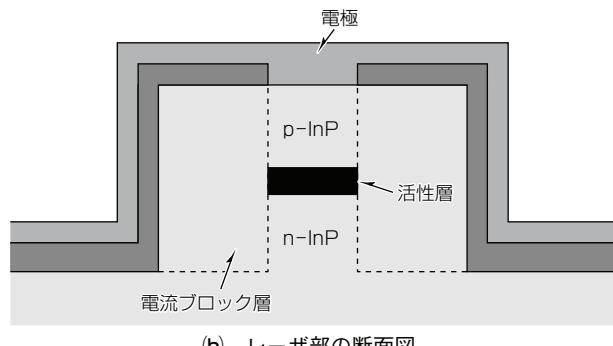
換素子の小型化によって、屋外設置の基地局用途で必要とされる−40～+95°Cの広い温度範囲での動作を保証しつつ、また、従来製品25Gbps EML CANと同じ熱電変換素子を適用することによって、1 Gbps当たりの消費電力を4分の1に低減することが可能になった。

## 2. EML素子設計

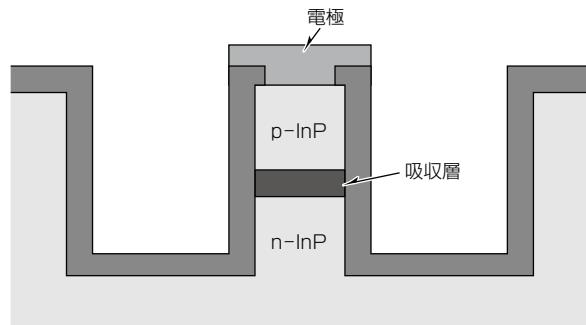
図3にEMLの素子構造を示す。高温特性に優れる埋め込み構造(図3(b))のDFB(Distributed Feed Back)と、狭い導波路幅でも高い光閉じ込め率が得られるハイメサ構造(図3(c))のEA変調器をモノリシック集積したハイブリッド構造を採用した<sup>(3)</sup>。100Gbpsという高速動作の実現には、EA変調器の容量の低減による広帯域化と消光比の確保の両立が課題になる。この課題を解決するため、まず帯域と消光比のトレードオフ関係を緩和できるハイメサ構造にし



(a) 上面図



(b) レーザ部の断面図



(c) EA変調器部の断面図

InP : インジウムリン

図3. EMLの素子構造図

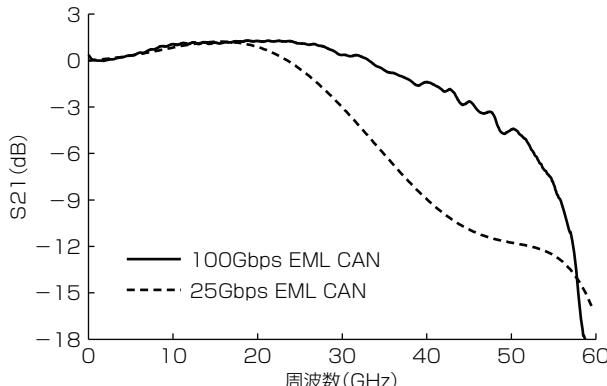


図4. EML素子の周波数応答特性(S21)

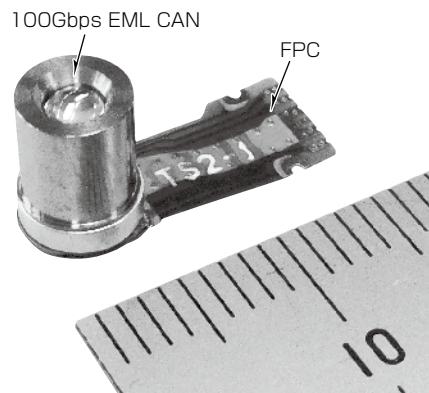


図5. FPC実装時の100Gbps EML CAN

た。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 (Multi Source Agreement) のLR1規格<sup>(4)</sup>を確保しつつ従来よりも緩和する設計を行った。

これによって、EML素子を誘電基板に搭載した状態の周波数応答特性は図4に示すように、従来製品の25Gbps用EML素子の3 dBカットオフ周波数は~30GHzであったのに対して、100Gbps用EML素子は~45GHzに拡大していることが分かる。なお駆動条件は、LD (Laser Diode) 駆動電流( $I_{op}$ ) = 100mA、EMLの設定温度( $T_{ld}$ ) = 55°C、ケース温度( $T_c$ ) = 25°C、EAオフセット電圧( $V_{off}$ ) = -1.6Vである。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。

### 3. EML CANの広帯域化設計

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。デバイスを駆動するための回路の出力インピーダンスが50Ωであるため、EML CAN構造のインピーダンスを50Ωに最適化することで反射が低減し、広帯域化が可能になるが、従来のCAN構造でのインピーダンス不整合箇所を改善する必要がある。

この製品はトランシーバに組み込まれる際、図5のようにステム裏面にFPCを接合することが一般的である。これによって内部構造としては図6に示すように、FPCからステムガラス貫通部を介してEMLに接続して電気信号が送られるが、従来はステムガラス貫通部のインピーダンスが50Ωにできておらず、これによって帯域が制限され

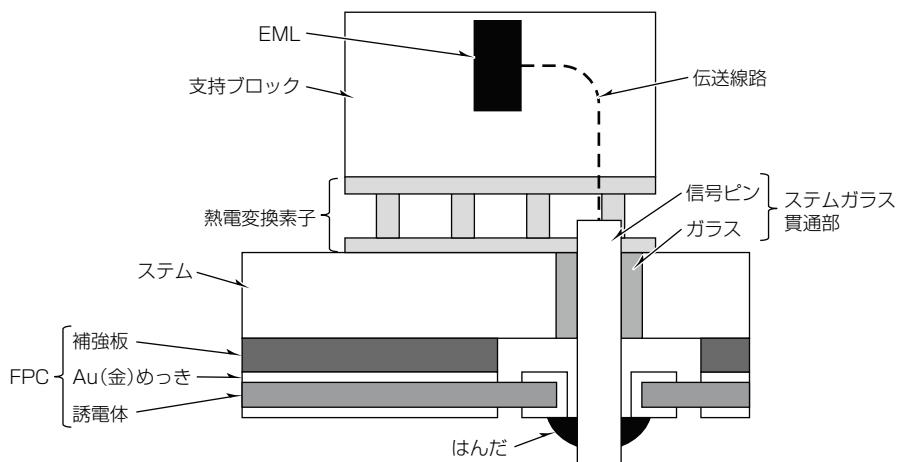


図6. 100Gbps EML CANの内部構造

ていた。そこで信号ピン径の細径化やガラス材質の低誘電率化を行うことで、図7のTDR(Time Domain Reflectometry)に示すように、ステムガラス貫通部のインピーダンスを50Ωに近づけることができた。また、FPCの補強板材質を導電性材料に変更し、GND(GrouND)層の上に当該補強板を実装することでステムとFPCのGNDを強化した。

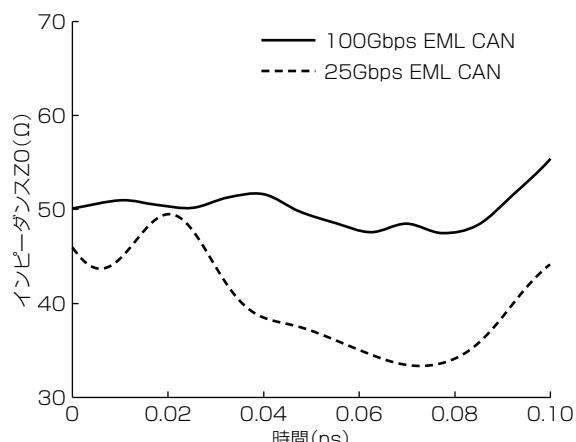


図7. ステムガラス貫通部でのTDR結果

## 4. EML CANの評価結果

表1に100Gbps EML CANの目標仕様及び評価結果を示す。

### 4.1 周波数応答特性(S21)の評価結果

図8に100Gbps EML CANと25Gbps EML CANの周波数応答特性(S21)を示す。25Gbps EML CANの3dBカットオフ周波数は~19GHzであったのに対して、100Gbps EML CANは~36GHzに拡大していることが分かる。なお、39GHzの急峻(きゅうしゅん)なディップは100Gbps EML CANの内部構造に起因する共振点の影響であるこ

表1. 100Gbps EML CANの目標仕様及び評価結果

項目	目標仕様	評価結果
発振波長	1,304.5~1,317.5nm	1,312.0nm
光出力(CW)@ $I_{op} = 100\text{mA}$	$\geq 10.5\text{dBm}$	12.8dBm
変調時光強度振幅	0.8~4.6dBm ( $I_{op}=60\sim 80\text{mA}$ )	0.8~4.6dBm
3dBカットオフ周波数	$\geq 35\text{GHz}$	36GHz
変調時消光比	$\geq 5.0\text{dB}$	5.6dB
TDECQ	$\leq 3.4\text{dB}$	2.5dB
熱電変換素子の消費電力	$\leq 0.7\text{W}@-40^\circ\text{C}$ $\leq 0.5\text{W}@95^\circ\text{C}$	0.46W@-40°C 0.38W@95°C

CW : Continuous Wave

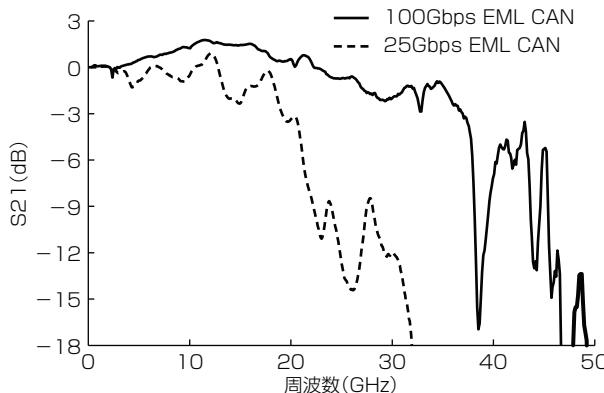


図8. 周波数応答特性(S21)

とが分かっているが、4.2節で述べる光波形は良好であるため影響は小さい。なお駆動条件は $I_{op} = 100\text{mA}$ ,  $T_{ld} = 55^\circ\text{C}$ ,  $T_c = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{off} = -1.6\text{V}$ である。

### 4.2 光波形の評価結果

図9に光波形の評価系を示す。評価にはドライバ内蔵型DSP(Digital Signal Processor)を用い、53.125GBdのSSPRQ(Short Stress Pattern Random Quaternary)と呼ばれるPAM信号伝送方式でのデータパターンを生成して100Gbps EML CANに入力し、出力されたPAM4光波形を専用の光オシロスコープで評価する系を構築した。評価に当たってはPAM4光波形の評価規格であるTDECQ(Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary)が最小になるように4値の強度レベルを調整した。

図10にオシロスコープで得られたBTB(Back To Back)のPAM4光波形を示す。評価の結果、変調時消光比(Outer ER) = 5.6dB, TDECQ = 2.5dBが得られ、標準化機関である100G Lambda MSAのLR1規格であるTDECQ  $\leq 3.4\text{dB}$ を満足できた。なお、このときの駆動条件は $I_{op} = 100\text{mA}$ ,  $T_{ld} = 55^\circ\text{C}$ ,  $T_c = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{off} = -1.65\text{V}$ である。また、Outer ERとTDECQの関係は図11に示すようにOuter ER  $\leq 7.0\text{dB}$ でMSAのTDECQ規格を満足でき、 $V_{off}$ と変調時光強度振幅(Outer OMA)の関係は図12に示すように $I_{op} = 60\sim 80\text{mA}$ で100G Lambda MSAのLR1規格MSAのOuter OMA規格を満足できる。

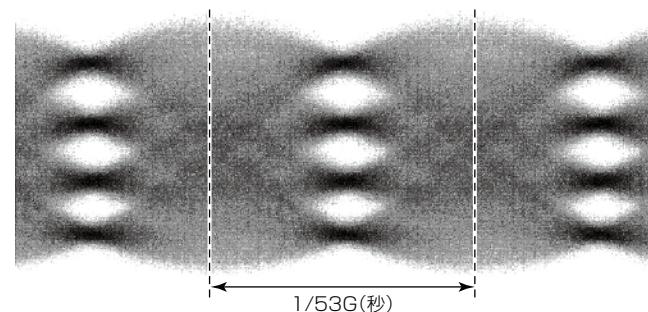
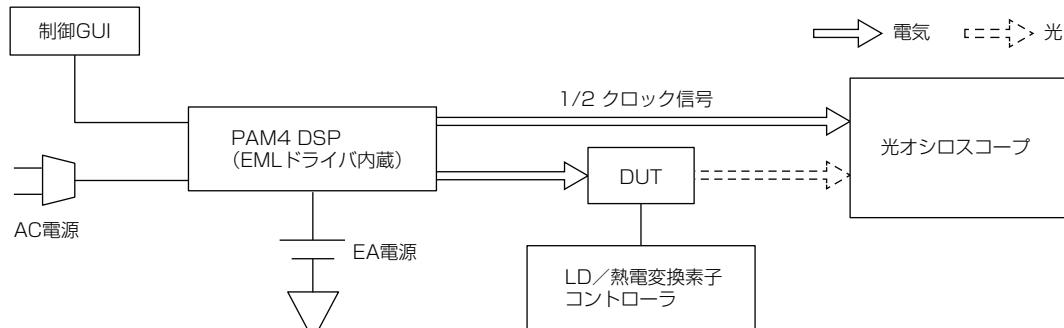


図10. PAM4動作時の光波形



GUI : Graphical User Interface, DUT : Device Under Test

図9. 光波形評価系

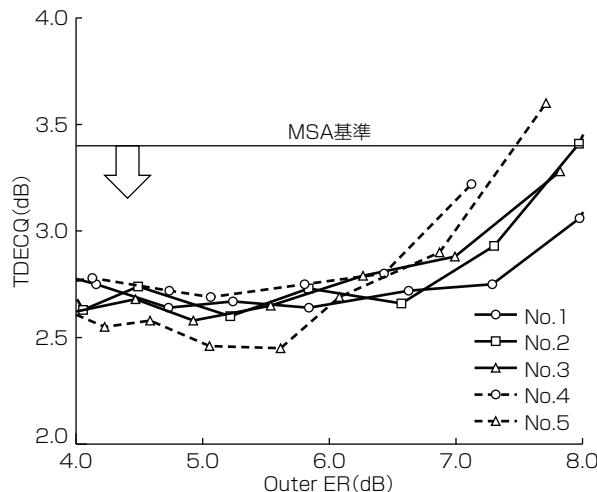
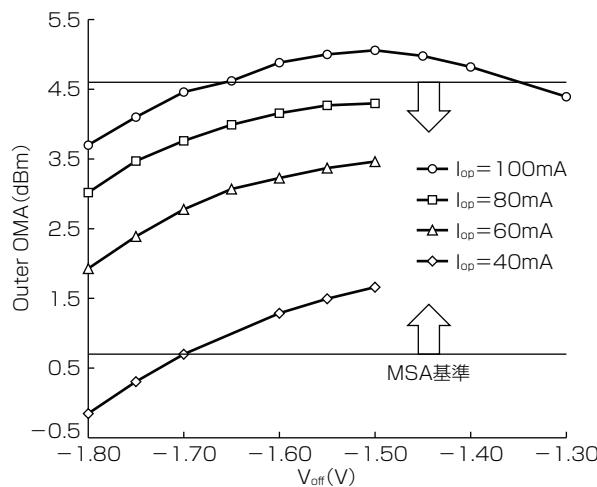


図11. Outer ERとTDECQの相関

図12. V<sub>off</sub>とOuter OMAの相関

#### 4.3 消費電力の評価結果

図13に $T_c$ を $-40^{\circ}\text{C}$ から $+95^{\circ}\text{C}$ に変化させたときの熱電変換素子の消費電力を示す。なお駆動条件は $I_{\text{op}} = 100\text{mA}$ ,  $T_{\text{ld}} = 55^{\circ}\text{C}$ である。

25Gbps EML CANと比較して $+95^{\circ}\text{C}$ での消費電力が約0.05W上昇しているが、これはシステムガラス貫通部のインピーダンス整合に伴ってシステム材質を変更したことによって、熱伝導性が変わったことが影響している。目標仕様としては $0.7\text{W}@T_c = -40^{\circ}\text{C}$ ,  $0.5\text{W}@T_c = 95^{\circ}\text{C}$ とし、1Gbps当たりの消費電力は25Gbps EML CANの4分の1に低減できた。

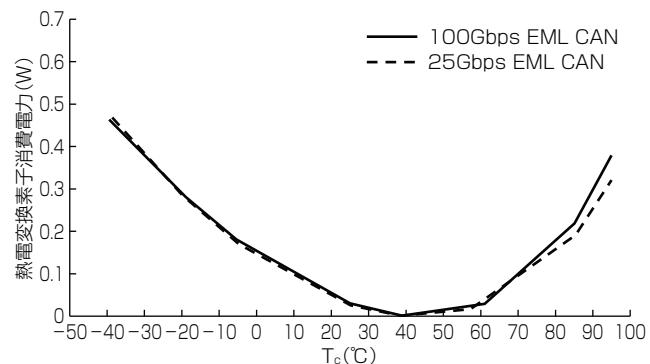


図13. 热電変換素子消費電力の評価結果

## 5. むすび

5G基地局向け100Gbpsで動作するEML CANを開発した。広帯域化の方法としては、EML素子のEA変調器長を短尺化し、パッケージ構造ではシステムガラス貫通部等のインピーダンス整合を行うことやFPCの補強板に導電性材料を導入することによって、信号反射の抑制が可能になり、35GHz以上の通過帯域を得ることが可能になった。

光波形の評価ではドライバ内蔵型DSPを用いて、BTBでOuter ER = 5.6dB, TDECQ = 2.5dB, Outer OMA = 0.8~4.6dBm ( $I_{\text{op}} = 60\sim 80\text{mA}$ )が得られ、100G Lambda MSAのLR1規格を満足する結果が得られた。熱電変換素子の消費電力では $0.46\text{W}@T_c = -40^{\circ}\text{C}$ ,  $0.38\text{W}@T_c = +95^{\circ}\text{C}$ になり、1Gbps当たりの消費電力としては25Gbps EML CANの4分の1に低減し、光通信システムの省電力化にも大きく貢献する。

## 参考文献

- (1) 渡辺洋次郎, ほか: 第5世代移動通信基地局向け25Gbps CAN型EML, 三菱電機技報, 93, No.3, 168~171 (2019)
- (2) Okada, N., et al.: Cost-Effective 10.7Gbit/s Cooled TOSA Employing Rectangular TO-CAN Package Operating up to 90°C, Optical Fiber Communication Conference, 2010, JWA38 (2010)
- (3) Morita, Y., et al.: 1.3μm 28Gb/s EMLs with Hybrid Waveguide Structure for Low-Power-Consumption CFP2 Transceivers, Optical Fiber Communication(OFC), 2013, America, paper OTh4H.5 (2013)
- (4) 100G Lambda MSA : 100G-FR and 100G-LR Technical Specifications Rev2.0 (2018)

# 400Gbps光送信モジュールのための 100G/λ EML集積化技術

100G/λ EML Integration Technique for 400Gbps Optical Transmitter Module

大畠伸夫\*  
Nobuo Ohata  
川本洋輔\*  
Yosuke Kawamoto  
村尾覚志\*  
Tadashi Murao

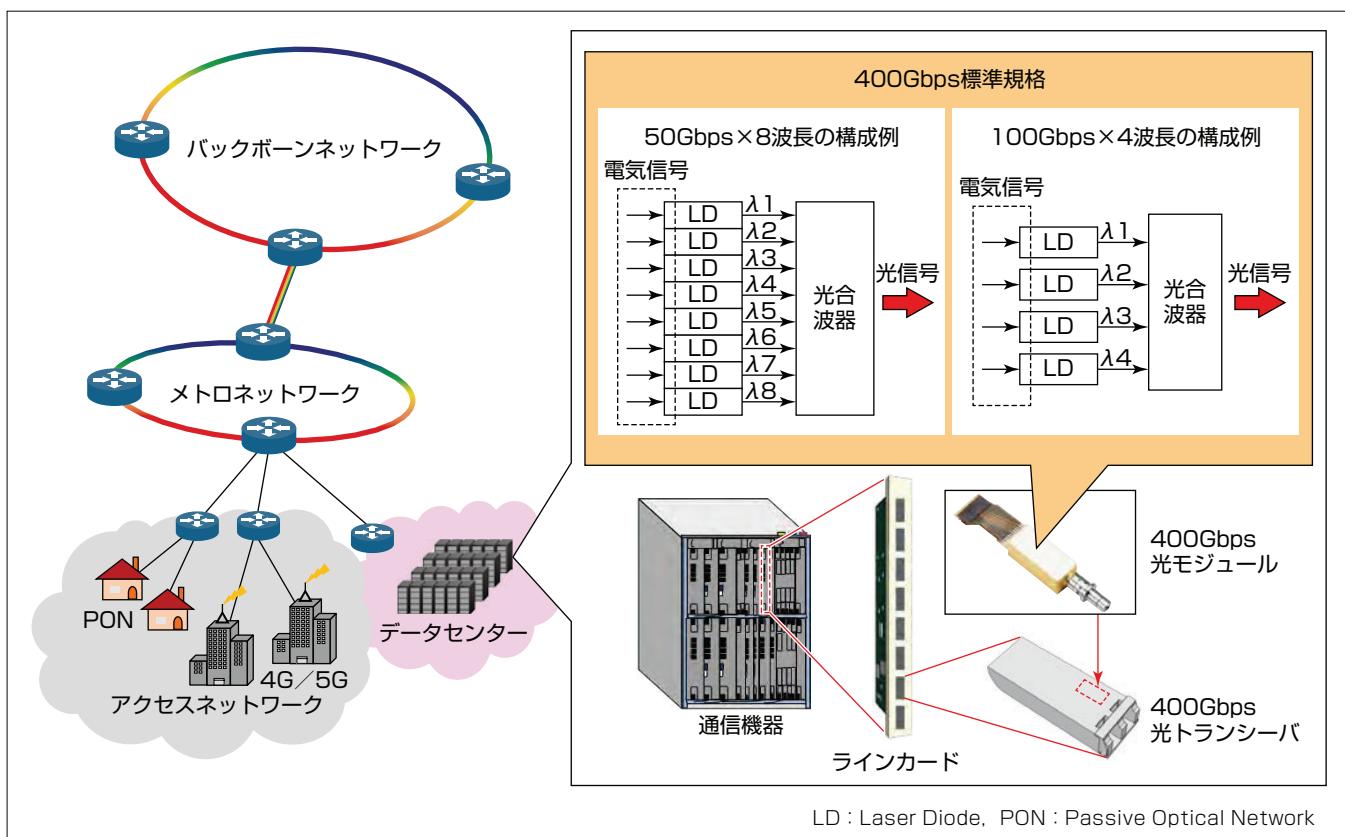
今井雄大†  
Yudai Imai  
板本裕光†  
Hiromitsu Itamoto

## 要旨

近年、スマートデバイスの普及で大容量の情報の取得が容易になり、通信トラフィックは増加の一途をたどっている。5Gが普及することで、クラウドAR(Augmented Reality)/VR(Virtual Reality)サービス、自動運転、スマートマニュファクチャリング等様々な活用が期待されており、光通信機器の更なる高速・大容量化が求められている。データセンターでは通信トラフィックが集中し、そこで使用されるルータやスイッチには従来40Gbpsや100Gbpsの光トランシーバが用いられてきたが、より大容量のデータを処理するために国際標準規格のIEEE802.3bsに準拠する400Gbps光トランシーバの導入が始まっている。この標準規格では伝送容量を上げるために2ビットの光信号を送り出すPAM4(Pulse Amplitude Modulation-4)変調が採用されている。50Gbps

の伝送容量を持つ光信号を8波長束ねて送受信する方式である。しかし、この方式は波長数が多く光モジュールのコストが高くなり、消費電力も大きくなる。一方、100G Lambda MSA(Multi-Source Agreement)では100Gbpsの伝送容量を持つ光信号を4波長束ねて送受信する方式が標準化された。この方式は光モジュールの構成を簡素化でき、消費電力も抑えられる。しかし、非常に高速な電気信号でそれぞれのレーザを変調するため、電気のクロストークが発生して光信号が劣化するという技術的課題があった。

三菱電機では集積化したレーザ駆動に伴って発生する電気クロストークを抑制する技術を新たに開発し、標準規格を満足する良好な光モジュール特性を実証した。



## 400Gbps光通信モジュールの構成及び適用例

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、通信機器の高速・大容量化のために400Gbps光トランシーバの需要が増加している。特にルータやスイッチに搭載するラインカードの容量を増やすために小型かつ低消費電力の光トランシーバが求められている。当社ではより低消費電力が期待できる100Gbps×4波長の構成を実現するための集積化技術を開発した。

## 1. まえがき

近年、スマートデバイスの普及で大容量の情報の取得が容易になり、通信トラフィックは増加の一途をたどっている。特にデータセンターでは通信トラフィックが集中し、そこで使用されるルータやスイッチには従来40Gbpsや100Gbpsの光トランシーバが用いられてきたが、より大容量のデータを処理するために100G Lambda MSA<sup>(1)</sup>では1波長当たり100Gbpsの光信号を4波長束ねて送受信する400GBASE-FR4/LR4が標準化された。この方式は光モジュールの構成を簡素にできるが、非常に高速な変調信号を四つ用いてそれぞれのレーザを変調するため、電気のクロストークが発生して光信号が劣化するという技術的課題があった。

当社では1波100Gbpsで動作可能なEML(Electro-absorption Modulator Laser)を集積した400Gbps光送信モジュールの電気クロストーク抑制技術を新たに開発し、標準規格を満足する良好な光波形品質を得ることに成功した。

## 2. 電気クロストークの抑制技術

### 2.1 光モジュールとプリント基板の接続構成

図1に400GbpsEML光モジュールと光トランシーバプリント基板の接続構成を示す。PAM4変調された100Gbpsの電気信号がDSP(Digital Signal Processor)から4レーン出力されて、それらは光モジュールのフレキシブル基板を介して光モジュール内に搭載されるEMLに加えられて、それぞれ異なる波長の光信号を出力する。EMLから出射するレーザ光は光合波器によって一つに束ねられてモジュールから出力される。DSPから出力される4レーンの電気信号はプリント基板やフレキシブル基板を並走するために電気クロストークが発生しやすい構造になる。一般的に電気クロストークを抑えるためには信号線路間の距離を離すことが有効であるが、業界標準仕様

であるQSFP56-DDトランシーバ<sup>(2)</sup>への搭載を考えると従来の100GbpsEML TOSA(Transmitter Optical Sub-Assembly)<sup>(3)</sup>と同等の小型サイズが要求されて、線路間距離を離さずに電気クロストークを抑制する技術が必要になる。次に線路間距離を離さずに電気クロストークを抑制する構造について述べる。

### 2.2 電気クロストークの抑制構造

電気クロストークを抑制するために今回フレキシブル基板に着目した。表1にフレキシブル基板の線路構成と得失比較を示す。フレキシブル基板にはマイクロストリップ線路が一般的に用いられる。誘電体基板を信号線路とGND(GrouND)導体で挟み込んだ構造であり、電磁界の一部は空気中に漏れる構造のため、複数の信号線路が並列に隣接する構造では空気中に漏れた電磁界が隣接する信号線路にカップリングして電気クロストークが発生する。一方、ストリップ線路は信号線路の上下をGND導体で覆う構造であり、電磁界は誘電体基板内に閉じ込められることになって、線路が隣接する場合でも電気クロストークを低減できる。しかし、この構造の場合電界は線路と上下のGND導体に集中するためにマイクロストリップ線路と比較して静電容量が2倍になる。信号線路は特性インピーダンスが50Ωになるように設計されており、例えばマイクロストリップ線路の線路幅が100μmで50Ωの特性インピーダンスになるように設計した場合、基板の厚みや誘電率が同じと仮定するとストリップ線路の線路幅は約50μmまで細くする必要があり、フレキシブル基板を曲げたときに断線

表1. フレキシブル基板の線路構成と得失比較

	マイクロストリップ線路	ストリップ線路	開口付きストリップ線路
A-A'断面図	電場 --- 磁場 基板 信号線路 GND	基板 信号線路 GND	基板 信号線路 GND
電気クロストーク特性	×	◎	○
線路幅	○(≈100μm)	×(≈50μm)	○(≈100μm)

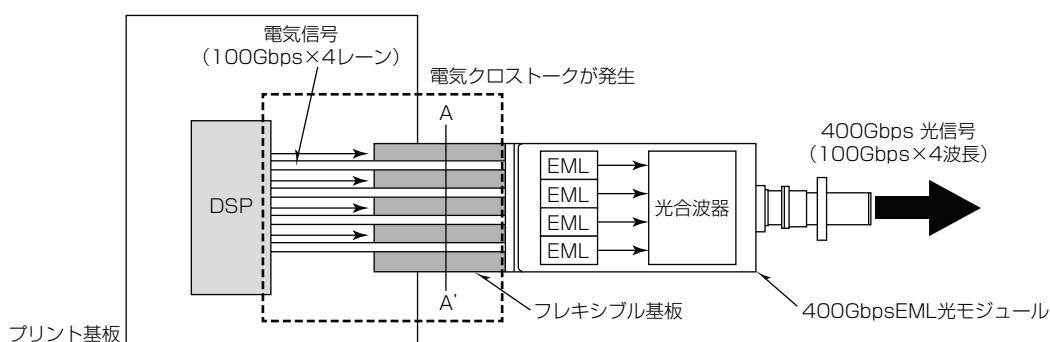


図1. 光モジュールとプリント基板の接続構成

しやすくなる。電気クロストーク抑制及び線路断線防止の両方の観点から今回新たに開口付きストリップ線路を考案した。この構造はストリップ線路に対して信号線路上部のGND導体の一部に開口を設けた構造であり、静電容量を低減できるため、線路幅を細くせずに特性インピーダンスを50Ωに整合できる。また、上面に配置されたGND導体によって電磁界が空気中に漏れることを抑制できるため隣接信号線路への電気クロストークも抑制できる。

### 2.3 シミュレーション結果

図2にフレキシブル基板単体の隣接線路間クロストークのシミュレーション結果を示す。シミュレーションでは隣接する信号線路の間隔を1.3mmとして、マイクロストリップ線路と開口付きストリップ線路それぞれの構造で計算を実施した。マイクロストリップ線路では周波数が高くなるにつれて電気クロストークが大きくなっている、周波数50GHzで約-27dBの電気クロストークが発生することが分かった。一方、開口付きストリップ線路の場合広い周波数範囲で電気クロストークが抑制できており、周波数50GHzでは電気クロストークが約-33dBになり、マイクロストリップ線路よりも6dBの改善効果を確認した。

フレキシブル基板単体での電気クロストークの改善効果が確認できたため、図1に示す光モジュールの接続構成で、それぞれのフレキシブル基板を用いたときの光出力波形のシミュレーションを行った。表2に100Gbps(53Gbaud PAM4)で駆動したときの光波形のシミュレーション結果を示す。シンボルパターンとしてSSPRQ(Short Stress Pattern Random-Quaternary)の一部を用いてシミュレーションを行い、シミュレーション結果から光波形の品質を示すTECQ(Transmitter Eye Closure for PAM4)を算出してそれぞれの条件で比較を行った。単レーンを駆動したときの光波形は非常に良好なアイ開口が得られており、TECQは2.2dBになった。フレキシブル基板にマイクロストリップ線路を用いたときの全レーン動作時の光波形は電気クロストークの影響によってアイ開口が閉じてしまい、TECQ

表2. 光波形のシミュレーション結果

	光波形	TECQ (dB)	ペナル ティ(dB)
単一レーン動作		2.2	—
全レーン動作 (マイクロ ストリップ線路)		3.4	1.2
全レーン動作 (開口付き ストリップ線路)		2.6	0.4

も3.4dBまで劣化する。TECQのペナルティとしては、電気クロストークがない単レーン駆動に対して1.2dB発生した。一方、開口付きストリップ線路を採用したときの全レーン駆動時の光波形は単レーン動作よりはアイ開口が閉じているが、マイクロストリップ線路を用いたときのアイ開口よりもクロストークの影響を受けておらず良好な開口が得られている。TECQペナルティも0.4dBになり、マイクロストリップ線路を用いたときと比較して0.8dBの改善効果があることを確認した。

### 3. 光モジュールの試作と評価結果

シミュレーションで良好な結果が得られることを確認したため、フレキシブル基板に開口付きストリップ線路を採用した光モジュールの試作・評価を行った。図3に試作した400GbpsEML光モジュールの写真を示す。大きさは6.5×

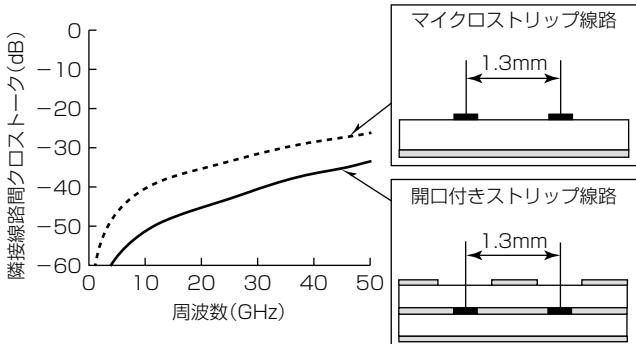


図2. 隣接線路間クロストークのシミュレーション結果

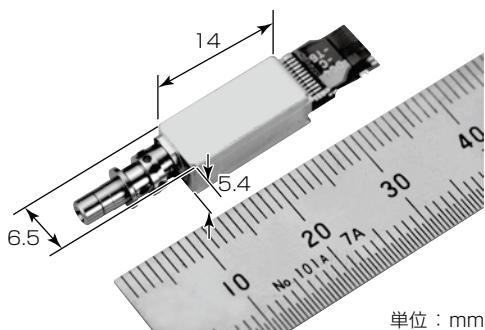


図3. 試作した400GbpsEML光モジュール

5.4×14(mm)であり従来の100GbpsEML TOSAと同等のパッケージサイズである。図4に試作した光モジュールの隣接線路間クロストークの評価結果を示す。フレキシブル基板単体での電気クロストーク評価は難しいため光モジュールで評価を行った。光モジュールの電気クロストークは周波数50GHzの帯域で約16.4dBであり、シミュレーション結果と比較して実測結果が極めて近いことを確認した。

次に光波形での改善効果を確認した。図5に光モジュールの評価系を示す。DSPから出力される電気信号は電気のドライバで増幅された後に光モジュールに加えられる。光波形のリニアリティが最も高くなるようにEMLのバイアス点の調整を行った。光波形はDCA(Digital Communications Analyzer)で測定した。電気クロストーク評価をするに当たって、L0～L3それぞれを単レーン駆動したときの光波形と、全レーン駆動したときの光波形のTECQを比較した。

表3に53Gbaud PAM4で駆動したときの光波形の測定結果を示す。シンボルパターンはSSPRQを用いており、T-Spaced 5 Tap FFE(Feed Forward Equalizer)処理後の光波形を示している。単レーン動作ではL0～L3全てのレーンでTECQが2.50dB以下の極めて良好な光波形を確認した。一方、全レーン動作時では電気クロストークの影響でTECQが劣化しているものの、全レーンで2.82dB以下

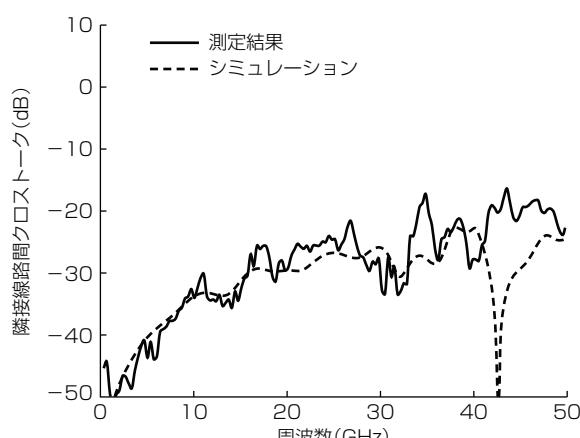


図4. 隣接線路間クロストークの評価結果

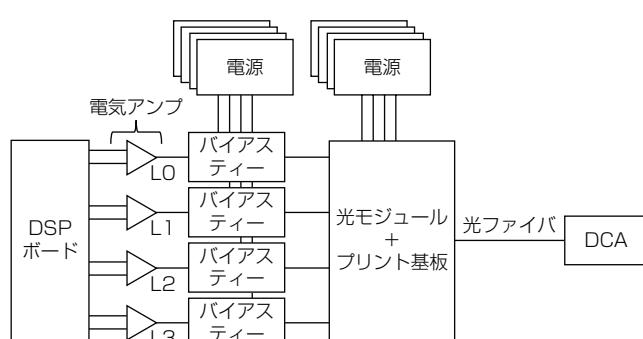


図5. 光モジュールの評価系

表3. 光波形の測定結果

レーン	単レーン動作	全レーン動作	ペナルティ (dB)
L0	TECQ : 2.50dB	TECQ : 2.69dB	0.19
L1	TECQ : 2.42dB	TECQ : 2.82dB	0.40
L2	TECQ : 2.35dB	TECQ : 2.55dB	0.20
L3	TECQ : 2.11dB	TECQ : 2.16dB	0.05

のTECQが得られ、規格で規定している3.90dBを満足する良好な結果を得た。電気クロストークによるTECQのペナルティとしては最大で0.40dBになり、開口付きストリップ線路を採用することで電気クロストークが効果的に抑えられることを実証した<sup>(4)</sup>。

## 4. む す び

1波長当たり100Gbpsで動作するEMLを集積した400Gbps光モジュールでは電気クロストークが課題になる。これに対して光モジュールのフレキシブル基板の信号線路に開口付きストリップ線路を採用することで、電気クロストークが抑制できることを実証した。電気クロストークで発生するTECQのペナルティは全レーンで0.4dB以下まで抑制でき、TECQも全レーンで2.82dB以下と規格を満足する良好な特性が得られることを確認した。

今後も高速・大容量化のトレンドは続くと考えられ、光デバイスの帯域も拡大していく中、集積化に伴って発生する電気クロストークを抑制する今回の技術は今後もますます重要になるであろう。

## 参 考 文 献

- (1) 100G Lambda MSA  
<https://100glambda.com/>
- (2) QSFP-DD MSA  
<http://www.qsfp-dd.com/>
- (3) Murao, T., et al.: Efficient Optical Alignment Technique for Compact 100 and 400 GbE TOSAs With Integrated Multiplexing With Free Space Optics. Journal of Lightwave Technology, **37**, No.3, 799~807 (2019)
- (4) Ohata, N., et al.: A Compact Integrated LAN-WDM EML TOSA Employing Stripline With an Aperture in the FPC. Journal of Lightwave Technology, **38**, No.12, 3246~3251 (2020)

# 80×60画素サーマルダイオード 赤外線センサ“MeIDIRシリーズ”

80x60 Pixels Thermal Diode Infrared Sensor "MeIDIR Series"

高橋貴紀\*  
Yoshinori Takahashi

前川倫宏\*  
Tomohiro Maegawa

## 要旨

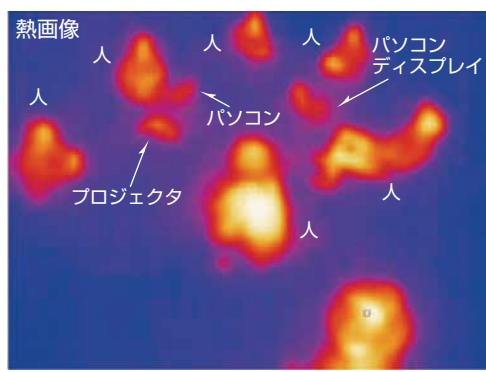
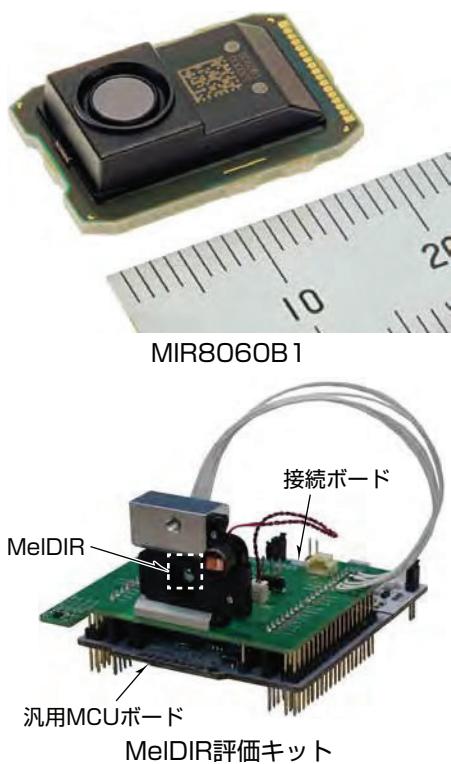
波長380nm(青)～780nm(赤)の可視光よりも波長の長い領域の光を赤外線と呼ぶ。中でも8～14μmの赤外線は、LWIR(Long-Wavelength InfraRed)と呼ばれており被写体温度の判別が可能で、可視光や微粒子による影響を受けにくい特長を生かし、単画素の人体センサから、高画素の監視カメラ用途まで幅広い用途で活用されている。

三菱電機では2019年に一般民生用向けに当社独自のサーマルダイオード方式の赤外線センサモジュール“MeIDIRシリーズ”的機種“MIR8032B1”を開発した。市場で一般的に採用されている16×16画素のサーモパイア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、当社ルームエアコン“霧ヶ峰”的“ムーブアイ mirA.I.+ (ミライプラス)”を始め、その他人体の表面温度測定等の製品にも搭載されている。

今回、“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”という防犯、見守り、スマートビルなどの市場からの新たな要請に対応するため、センササイズを変えることなく80×60画素に拡大したセンサモジュール“MIR8060B1”を開発してラインアップを追加した。

また赤外線センサモジュールとともに、顧客側の評価・開発を支援するユーザーサポートツールを提供している。



MCU : Micro Controller Unit

## 赤外線センサモジュール“MIR8060B1”的撮像イメージ

左上は赤外線センサモジュールMIR8060B1の外観を示す。左下はMeIDIRシリーズで提供するユーザーサポートツールの一つMeIDIR評価キットである。右下はMIR8060B1を使用して会議の様子を撮像した熱画像であり、熱源である人、パソコン、ディスプレイ、プロジェクタが識別可能であることが分かる。

## 1. まえがき

当社では2019年に一般民生用向けに当社独自のサーマルダイオード方式の赤外線センサモジュールMeDIRシリーズの機種MIR8032B1を開発した。市場で一般的に採用されている16×16画素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)を実現した。

本稿では、MeDIRシリーズの技術的な特長と、新たに画素数を80×60画素に拡大したMeDIRシリーズの新機種であるMIR8060B1の特長について述べる。

## 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0K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)。

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

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

$$C_2 = 1.44 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$$

$\lambda$  : 波長,  $T$  : 絶対温度(K),  $C_1, C_2$  : 放射定数

図1に波長に対する黒体温度ごとの電磁波の放射量を示す。LWIRは低温から放射され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。

実際の物体の電磁波の放射量は物体の種類や表面状態によって異なる。黒体と比べた物体の放射量の割合は、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

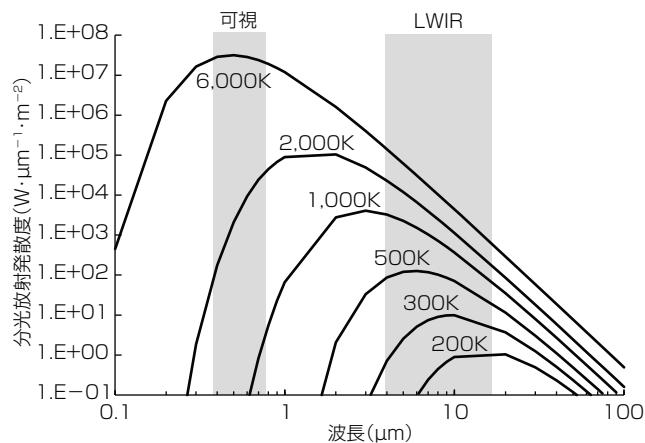


図1. 黒体からの分光放射発散度

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LWIRの領域は吸収が少なく、“大気の窓”と呼ばれて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、波長が長いため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

赤外線センサとは、受光した赤外線を電気信号に変換して非接触で物体の熱を検知するサーマルセンサである。赤外線センサは①暗視が可能②外乱光の影響を受けにくい③散乱の影響を受けにくい(例:煙が充満した状況でも対象の識別が可能)という特長がある。また、画像化しても可視光線に対して感度を持たず、人体の認識は可能であるが個人認識まではできないためにプライバシー保護が必要な用途にも適している。図2に赤外線画像(熱画像)例を可視画像との比較で示す。

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あり、感度は高いが熱雑音の影響を低減するために冷却装置を必要とし、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、温度変化の検出方法が異なる、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。



図2. 赤外線センサの特長

焦電センサ方式は強誘電体の分極変化を検出する方式で、温度変化に対して起電力が発生するために静止した物体の検知に向きであり、製造方法から多画素化には向きであるが、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り、簡単な人感センサなどに利用されている。

サーモバイル方式は異種金属を接合した熱電対を温度検知部に利用する方式で、一つの熱電対の感度が低いため実用的な感度を得るために一つの画素を多数の直列接続された熱電対で構成する。そのため画素サイズが大きくなり、画素数増加に伴って急激に価格が高くなる傾向があるが、省電力で校正が容易なため比較的画素数の少ないセンサに利用されている。

ポロメータ方式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つて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に規模の大きな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・検査コストが大きいことでもセンサ価格が高価になる傾向がある。

### 2.3 サーマルダイオード方式

当社ではこれまでの赤外線センサと異なり、ダイオードを温度検知部とする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が特徴で、ポロメータ方式と同様に半導体工程との相性が良く高感度を得やすく多画素化が容易な方式である。温度検知部のダイオードは順方向に一定電流で駆動し、温度変化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つため補正が容易で、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の均一性が高いという特長を持つ。

## 3. 赤外線センサモジュールMelDIR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2極化していた。より高度な熱源の状態の把握が可能で低価格な製品に対する市場からの要求は以前からあったが、従来のセンサ技術の制約から高画素かつ低価格なセンサを提供できなかった。

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、図3に示すように従来なかった画素数と価格帶

の赤外線センサモジュールとしてMelDIRシリーズ(以下“MelDIR”という。)を開発した。

### 3.1 MelDIRの高感度化技術

熱型赤外線センサは温度検知部の温度変化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に空間分解能が低下する。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、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。この支持脚構造は温度検知部のダイオード構造と周辺の読み出し回路をシリコン半導体製造工程で形成後ドライエッ칭を行うことで形成しており、低コストで製造できる。図4にMelDIRの温度検知部の拡大写真を示す。25μm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。

温度検知部は中空構造形成とともに真空状態にすることで更に感度を高くできる。MelDIRは3.3節に述べるチップスケールパッケージ技術を併用することで高感度を実現している。

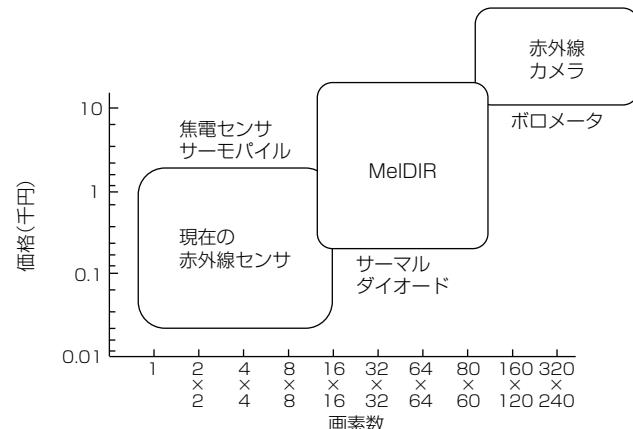


図3. 赤外線センサの要求価格と画素数

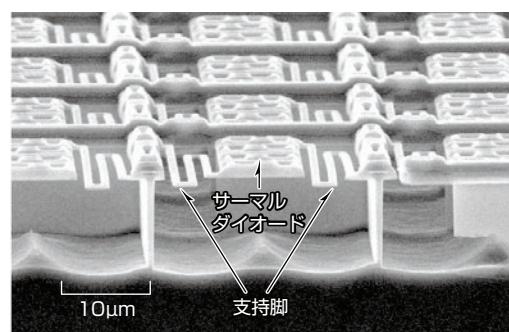


図4. MelDIRの温度検知部の拡大写真

### 3.2 チップスケールパッケージ技術

高感度化のため温度検知部周辺を真空状態で維持するためには、赤外線を透過しつつ真空状態で封止するパッケージ技術が必要である。従来はセラミックパッケージ上にセンサチップを実装し、赤外線を透過する窓材を真空環境下でセラミックパッケージ上に張り合わせることで真空状態を形成していた。このパッケージ方法だと部品点数と工程数が増加し、またチップごとの処理のために生産性も低く高コストになる。

MeIDIRは上記課題を解決するため、図5に示すようにセンサチップ上に封止枠を形成してチップ上に直接窓部材で封止するチップスケールパッケージを開発した。この技術によってMeIDIRは従来パッケージと比べて体積比で15%まで小型化を実現し、同時に製造コストの低減を実現している。

### 3.3 モジュール技術

赤外線センサは赤外線を検知するセンサ素子以外に、遠方から放射された赤外線を温度検知部に集光する光学系と、センサ素子を駆動する制御機能、温度検知部から熱電変換されて出力された電圧をデジタル信号に変換する機能を必要とする。

MeIDIRはこれらの機能に加えて、センサ画素ごとの感度ばらつきを補正する感度補正機能と、モジュール基板温度を監視するための温度計測機能、外部MCUとの間のデータ通信を少ない端子数で実現するSPI(Serial Peripheral Interface)通信機能を内蔵している。それによってユーザーは3.3V電源、センサリセット電圧、SPI通信用の3端子を接続するだけで簡単に赤外線画像を取得できる。

図6にMeIDIRのモジュール構成のブロック図を示す。モジュールは赤外線をセンサ温度検知部に集光するシリコンレンズ、赤外線を検知するセンサ素子、基板の温度を計測するサーミスタと、センサの制御・信号処理・MCU通信機能を内蔵したASIC(専用集積回路)で構成されている。ASIC内には主要な制御機能とともに、出荷時に各種パラメータを記憶させるOTP ROM(One Time Programmable Read Only Memory)を内蔵しており、出荷時に各

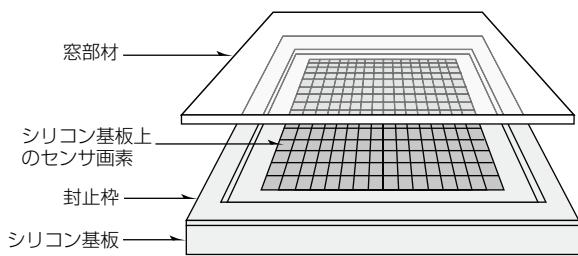
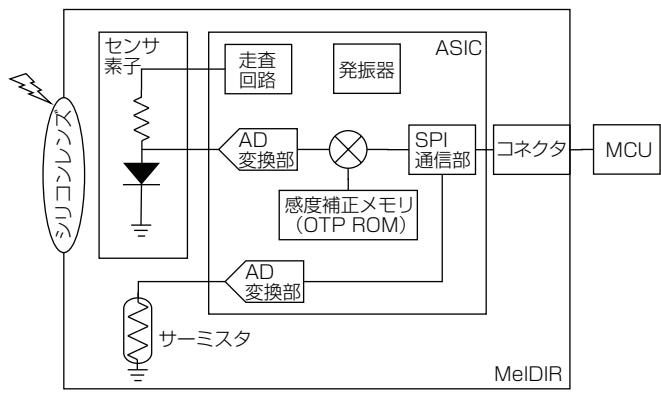


図5. チップスケールパッケージの構造図



AD : Analog to Digital

図6. MeIDIRのモジュール構成のブロック図

モジュール固有の情報を記憶させることができます。

図7にMeIDIRのモジュールの外観を示す。サーマルダイオードセンサとMeIDIR用に開発されたASICはシリコンレンズを実装したレンズキャップ内部に実装されている。センサ裏面に基板温度計測を行うサーミスタやセンサ外部との信号のやり取りを行うためのコネクタ、その他表面実装部品が実装されている。

MeIDIRには画素ごとの感度ばらつきを補正する感度補正機能を内蔵している。センサの感度はダイオードの出来映えのばらつきとレンズの集光特性による光学系の利得分布によって画素ごとに異なる特性を持つ。サーマルダイオード方式のセンサは線形な熱電変換特性を持つため各画素の感度補正係数を求めることが容易で、補正処理もASICに内蔵された乗算回路だけで可能である。

図8は全面が40°Cの熱源と25°Cの熱源を測定した際の

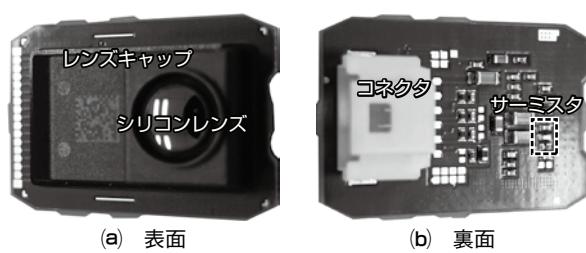


図7. MeIDIRのモジュール

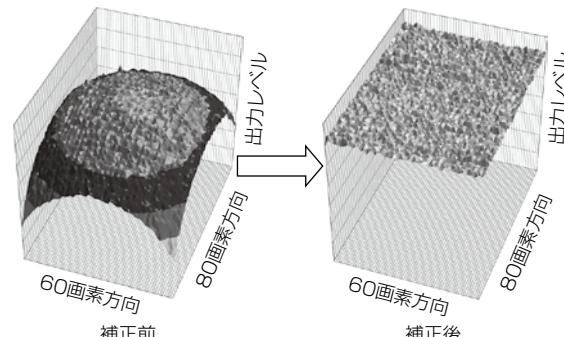


図8. 全面一定温度の熱画像の感度補正前後の特性

感度補正前後の出力レベル差の分布を示す。感度補正前は、レンズの集光特性や個々の画素の出来映えの差によるばらつきがあるが、補正後は一様な出力特性が得られており、補正の結果面内の感度が一定になっていることが確認できる。

## 4. MIR8060B1

### 4.1 MIR8060B1の特長

2019年MelDIRシリーズの最初の機種としてMIR8032B1の販売を開始し、空調や体表面温度測定などの用途に適用されている。2021年に新たにMIR8032B1からモジュールサイズ、形状をそのままに画素数と画角を拡大するとともに、従来の4fps(frames per second)のフレームレートに加えて8fpsへの切替え機能を追加し、速く動く熱源の検知に対応した機種MIR8060B1を開発した。表1にMelDIRの主要諸元を示す。

MIR8060B1はMIR8032B1と比べて画角で約1.8倍、画素数で約1.9倍拡大されており、MIR8032B1と同等の空間分解能で検知できる面積を2~4倍に拡大した(図9)。この広画角化と高画素化によって、広範囲での熱源の識別と行動把握検知を可能にした。

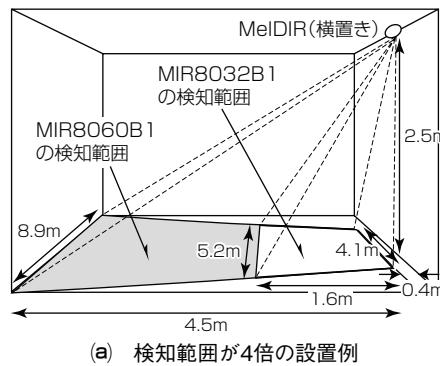
図10に一般的なオフィスビルの天井(約2.5m)に設置して廊下を撮影した可視画像及びMIR8032B1とMIR8060B1で撮影した熱画像の画角による比較を示す。

MIR8032B1の画角では廊下の端の人が画角から外れるため、はっきりと認識できていないがMIR8060B1では空間分解能を下げずに広角化を行っているため端の人まではっきり認識できていることが分かる。

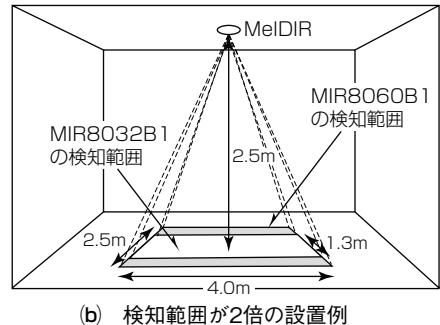
### 4.2 ユーザーサポートツール

MelDIRはMIR8032B1の発売開始から、顧客による評価・開発をサポートするためのユーザーサポートツールを拡充してきている。新たに発売するMIR8060B1も発売と同時にこれらのツールを提供する。

ユーザーサポートツールは各用途での適用提案などの資料や製品評価が可能な評価キット(図11)、顧客の製品開



(a) 検知範囲が4倍の設置例

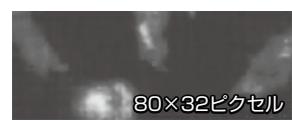


(b) 検知範囲が2倍の設置例

図9. MelDIRの設置条件による検知範囲の比較



(a) 可視画像



(b) MIR8032B1の熱画像  
(画角: 78×29°)



(c) MIR8060B1の熱画像  
(画角: 78×53°)

図10. MelDIRで撮影した熱画像の画角による比較

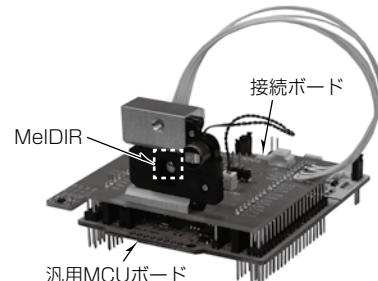


図11. MelDIR評価キット

発で行われるソフトウェア／ハードウェア設計をサポートするためのリファレンスコード、リファレンスデザインを提供することで、顧客の製品開発期間の短縮に貢献する。

## 5. むすび

当社は従来の赤外線センサが提供できなかった市場に向けて赤外線センサモジュールMelDIRシリーズを開発した。2019年に販売を開始した80×32画素のMIR8032B1に加えて、2021年新たにセンササイズを変更することなく画素数を80×60画素として画角を拡大するとともに、フレームレートを従来の4fpsに加えて8fpsの切替えを可能にしたMIR8060B1を開発して製品ラインアップを強化した。従来採用されていた空調と体表面温度測定分野に加えて、より広い画角と動く熱源の検知性能を生かして防犯、見守り、人数カウント、スマートビルなどの新たな適用分野で用途を拡大して社会に貢献していく。

表1. MelDIRシリーズの主要諸元

型名	MIR8060B1	MIR8032B1
モジュールサイズ	19.5×13.5×9.5(mm)	
画素数	80×60	80×32
画角	78×53°	78×29°
フレームレート	4 / 8fps	4fps
消費電流	50mA	

# 特集論文

## 赤外線センサ“MeIDIRシリーズ” を用いた熱画像処理技術

三輪祥太郎\*  
Shotaro Miwa

Thermal Image Processing Technologies Using Infrared Sensor  
"MeIDIR Series"

### 要旨

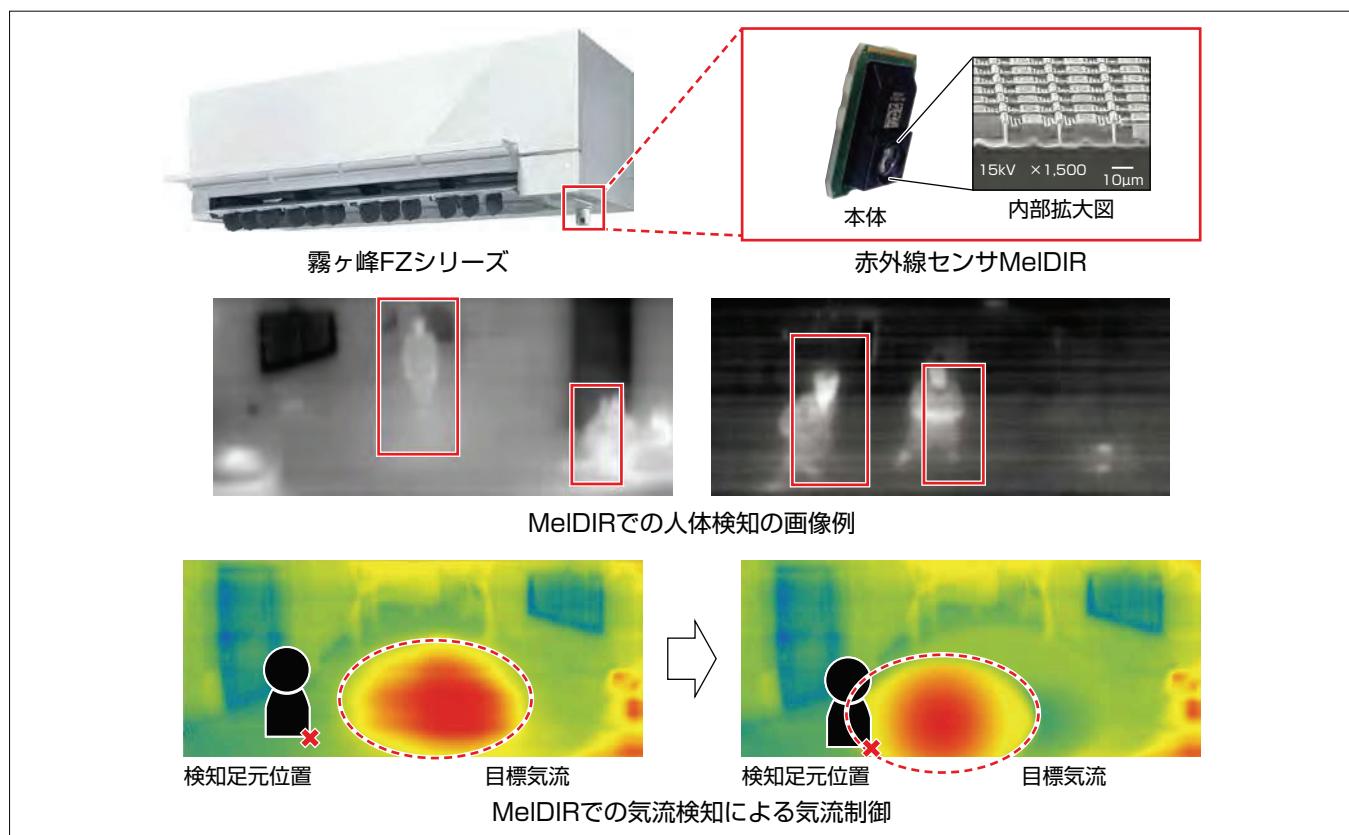
近年非冷却赤外線センサの市場は、産業用途に加えて、民生用途の拡大が予想されている。

民生市場で三菱電機は、他社に先駆けて<sup>(注1)</sup>安価なサーモパイルを用いた赤外線センサをルームエアコン向けに投入した。人体の表面温度を計測した人の温冷感や、床、壁のふく射温度を計測した人の体感温度を推定し、人の状態に合わせた快適性を実現するとともに、空調制御を最適化することで省エネルギー性の実現を行ってきた。一方、近年では、リビングの多目的利用化等に対応した、更に高解像度のセンサを用いた熱画像認識の高度化が求められている。しかし、産業用途で用いられる高解像度かつ高感度なボロメータはコストが高く民生用途への転用が困難である。

また、サーモパイルを多素子(高解像度)化した場合、コストの上昇に加えて、センササイズの大型化で従来のセンサスペースに収まらないという問題が起きる。

これに対して、当社は低価格かつ高感度という特長を持つ独自のSOI(Silicon On Insulator)構造のサーマルダイオード方式を用いた高精度赤外線センサ“MeIDIRシリーズ”(以下“MeIDIR”という。)を開発した。MeIDIRは、従来のサーモパイル型比で、素子数は80倍、感度は2.5倍を実現している。今回、MeIDIRを用いた熱画像処理技術として、人体検知技術の高度化と、従来は不可能であった、気流の到達範囲を正確に把握する気流検知技術等について述べる。

(注1) 1999年12月現在、当社調べ



### 高精度赤外線センサ“MeIDIR”を搭載したルームエアコン“霧ヶ峰FZシリーズ”

当社独自のサーマルダイオード方式を用いて、低成本、小サイズと高精度を実現した赤外線センサMeIDIRは当社ルームエアコン霧ヶ峰FZシリーズに搭載している。従来のサーモパイル方式のセンサと比較して、大幅な高解像度化・高感度化を実現し、人体検知、気流検知等の新機能を実現した。

## 1. まえがき

近年、非冷却の赤外線センサの市場が拡大している。赤外線センサは熱を捉えるという可視画像にはない特長を持ち、自動運転や監視カメラ等の産業用途でその特長を發揮してきたが、今後は、家電等民生向けの市場の拡大が期待されている。ただし、産業用途に用いられるような、ボロメータを用いた赤外線センサは、高性能ではあるものの、高価格であり、民生用途にそのまま流用することは困難である。

一方、民生用途では、室内の温度を制御するルームエアコン向けに、赤外線センサが重要な役割を担ってきた。家電ではセンサに対するコスト要求が厳しいため、赤外線センサとしては安価なサーモパイルがこれまで用いられてきた。このような中で、近年ライフスタイルの変化などによって、リビングが多用途で使われる多機能空間へと変化し、ユーザーの意図したところに気流が届かないなどの事例が起きている。このような事例を解決するには、より高度な熱画像認識が必要であり、赤外線センサの更なる高解像度化、高感度化が必要であるが、従来のサーモパイルの場合、コストの上昇及びセンササイズの増大によって、その実現が困難であるという課題があった。これに対して、当社は、2019年に家電搭載が可能な低価格でありながら、従来のサーモパイルと比較して、高解像度・高感度という大幅な性能向上を実現した赤外線センサMeIDIRを開発した。

本稿では、当社のルームエアコン向けの熱画像処理技術を中心に、従来のサーモパイルを用いた赤外線センサを用いた熱画像処理技術から、赤外線センサMeIDIRを用いた熱画像処理技術について述べる。

## 2. サーモパイルを用いた赤外線センサ

当社のルームエアコンでは従来サーモパイルを用いた赤外線センサを用いて室内の熱画像を取得してきた。赤外線センサを用いた温度測定として、物体からの赤外照射を赤外線吸収体に受けて、その温度上昇を温度センサ部で測定して電気信号として出力することで、離れた位置の温度を計測する(図1)。サーモパイルを用いた赤外線センサは、温度センサに異種半導体・金属を用いてその接点での熱起電力を発生を計測することで温度測定を行う。

当社のルームエアコンに搭載されているサーモパイルを用いた赤外線センサは、画素数の増加等の進化を重ねて、最新のセンサでは、32画素が垂直方向に並んだアレー型のセンサになっている。このアレー型のセンサを水平方向に走査して、室内の熱画像を取得する。

取得した熱画像を用いて、人体の表面温度を計測することで、人の温冷感の推定、また、床と壁のふく射温度を計測することで人の体感温度を推定し、人の状態に合わせた快適性の実現と、空調制御を最適化することで省エネルギー性を実現してきた。

サーモパイルを用いた赤外線センサでは、人体検知を行う場合、背景差分を前処理にした処理を行っている。図2に人体検知の例を示す。まず、人がいると思われる人体検知枠を背景差分で抽出し(図2(a))、次に、背景温度モデルと人の体温モデル等を用いた人体検知技術によって人体領域を検知する(図2(b))。

## 3. 高精度赤外線センサMeIDIR

一般的に高解像度・高感度が要求される産業用途では、ボロメータを用いた赤外線センサが用いられる。ボロメータを用いた場合、図1の温度センサ部に酸化バナジウムなどの特殊な抵抗体を用いており、抵抗体の成膜に特殊なプロセスが必要で、複雑な製造技術が必要である。このため、

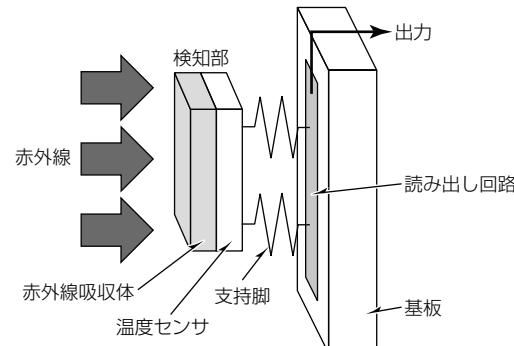
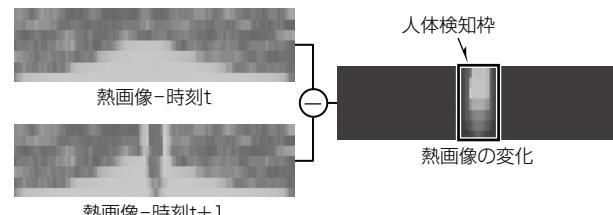
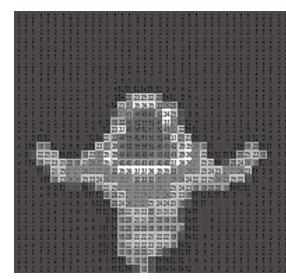


図1. 赤外線センサの温度測定モデル



(a) 人体検知枠の抽出



(b) 人体領域の検知

図2. 人体検知

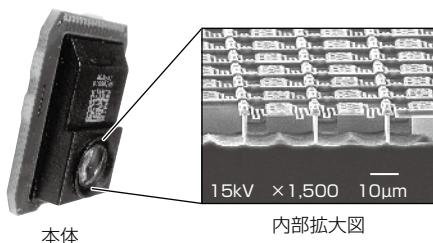


図3. サーマルダイオード方式の赤外線センサMeIDIR

低価格化が困難である。

一方、当社独自のセンサとして、比較的安価でかつ高画素・高感度が見込めるSOI構造のサーマルダイオード方式を用いた赤外線センサMeIDIRを開発した(図3)。サーマルダイオードを用いた赤外線センサの場合、図1の温度センサとして単結晶シリコンダイオードを用い、温度変化による電流電圧の特性変化を計測することで温度を測定する。SOI構造のサーマルダイオード方式を用いた赤外線センサの特長として、製造時にシリコンLSIの製造プロセスを活用することが可能で、低雑音の読み出し回路とともに一括形成することで、比較的低価格に製造できる。また、単結晶のシリコンダイオードを用いることで、均一性に優れた感度ばらつきの少ないセンサの実現が可能である。

#### 4. MeIDIRを用いた熱画像処理技術

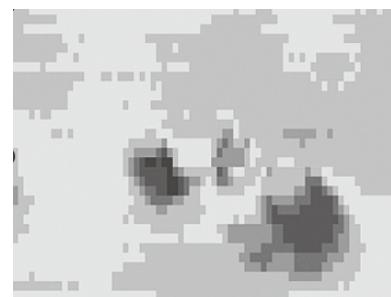
赤外線センサの特長は熱を捉えることであり、当社のルームエアコンでもサーモパイルを用いた赤外線センサを用いて人体検知や窓検知等を行い、快適性と省エネルギーの実現に用いてきた。しかし、多用途で使われる多機能空間へと変化しつつあるリビングでは、より広い空間、より多様な姿勢の人物、また家具等の障害物にロバストな熱画像処理技術が必要であった。このような高度な熱画像処理を行うためには、センサの高解像度化が必要であるが、従来のサーモパイルを用いた赤外線センサでは、高解像度化のためにはセンサの大型化が避けられずルームエアコンへの搭載が困難であった。

2019年に製品化されたMeIDIRは、家電への搭載が可能な低価格でありながら、従来のサーモパイルを用いた赤外線センサと比較して、高解像度・高感度という大幅な性能向上を実現している。さらに、MeIDIRを用いた赤外線センサは、そのセンササイズが従来のサーモパイルを用いた赤外線センサの約半分という大幅な小型化を実現しており、ルームエアコンへの搭載が容易という特長がある。

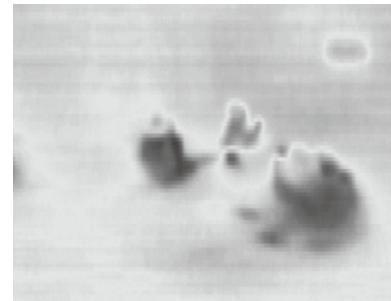
サーモパイルを用いた赤外線センサとMeIDIRとを比較すると、従来のサーモパイル型では、素子数が $1 \times 32$ 素子であったのに対して、MeIDIRでは素子数が $80 \times 32$ と大きく向上している。また、感度も2.5倍に向上している。

図4に姿勢や場所の異なる人を対象に、従来のサーモパイルで取得した熱画像とMeIDIRで取得した熱画像を示す。MeIDIRを用いることで人に関するより詳細な熱画像が得られていることが分かる。

従来のサーモパイルでは背景差分を前処理として行ってきたが、MeIDIRを用いて詳細な熱画像が得られることで、背景差分を用いることなく画像一枚からの物体検知が可能になった。当社はこれまで可視画像からの顔検知技術として、高速性と逆光等対象が視認性が悪い状態でも検知が可能なロバスト性とを備えた技術を開発し、監視カメラ等に搭載してきた(図5)。今回、このような可視画像向けの機械学習を用いた顔検知技術<sup>(1)</sup>をMeIDIRの熱画像に適用した結果を示す(図6、図7)。当社のルームエアコンでは、広い室内をセンシングするために、まず赤外線センサを水平方向に走査して部屋全体のパノラマ画像を生成する。高精度赤外線センサMeIDIRを用いることで従来は困難であったパノラマ画像一枚からの高精度物体検知が可能になり、多様化するリビングに対応して人の快適性と省エネルギー性の更なる改善が可能になった。



(a) サーモパイル



(b) MeIDIR

図4. サーモパイルとMeIDIRによる熱画像の比較

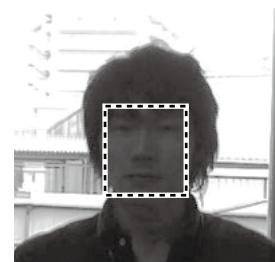
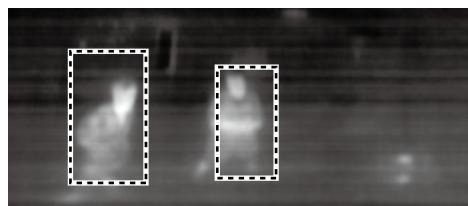


図5. 顔検知技術

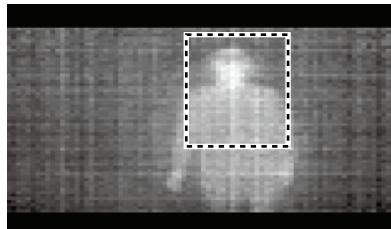


(a) 热画像例 1

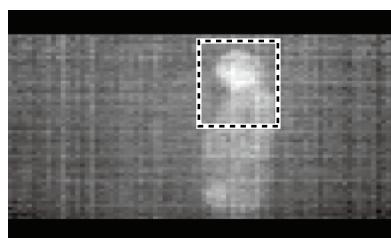


(b) 热画像例 2

図6. MeIDIRでの人体検知



(a) 热動画 1



(b) 热動画 2

図7. 固定センサとして用いたMeIDIRの近距離人体検知

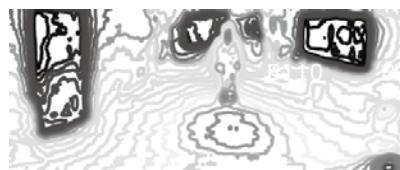
また、最新のMeIDIRは $80 \times 60$ の解像度を持ち固定センサとしての利用が可能であり、図7にMeIDIRを固定センサとして使用した際の近距離人体検知結果を示す。画素数の制約で遠方の人は検知が困難であるが、近距離であれば人体検知が可能であることが分かる。

## 5. 気流検知

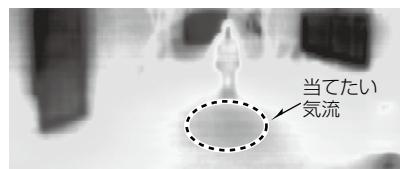
当社は、2019年に高精度赤外線センサMeIDIRを搭載したルームエアコンを製品化した。MeIDIRを用いることで、従来のサーモパイルを用いた赤外線センサと比較して、物体検出技術の高度化が可能になるが、2019年に発売したルームエアコンでは、従来困難であった気流検知を新機能として実現した。図8に気流検知処理結果を示す。気流検知では、ルームエアコンのフラップ角度や吹き出し温度等の情報を用いて、ユーザーに届けたい温度を持つ気流の検知を可能にする。この気流検知技術によって、ユーザーに



(a) 热画像



(b) 前処理



(c) 目標気流検知

図8. MeIDIRでの気流検知

所望の気流が届いているかを検知できる。

この気流検知技術によって、従来、家具や窓からの冷気等環境条件によってユーザーの足元に気流が届けられない場合で、気流の状態が分からず抜本的な解決が困難であったが、気流検知によってユーザーの足元に正確に気流を届けることが可能になり、従来よりも大幅な快適性向上を実現した。さらに、吹き出し温度を上げるという解決策を取ることなく、吹き出し温度は変えずに気流の到達位置を変えるという解決策が取れることで、省エネルギー性も実現できている。

## 6. むすび

当社は他社に先駆けてサーモパイルを用いた熱画像センサをルームエアコンに搭載してきたが、近年ライフスタイルの変化などによって、リビングが多用途で使われる多機能空間へと変化し、人や空間のより高度な熱画像認識が求められる中で、当社独自の高解像度・高感度なMeIDIRを用いることで実現した熱画像処理技術について述べた。従来のサーモパイルと比較して、高精度の人物検知と、気流検知が実現できることを示し、多機能化する空間でも快適性と省エネルギー性の向上が実現できることを示した。今後は、更なる熱画像処理技術の開発を進めて、当社独自の低価格の高精度熱画像センサを用いた新機能開発を行っていく。

## 参考文献

- (1) Miwa, S., et al.: Context-based robust face detection algorithm for surveillance cameras, IEEJ, 7, No. 6 (2012)

# 高加速試験による評価期間短縮と保護膜の解析技術向上

*Shortening of Evaluation Time by Highly Accelerated Stress Test and Improvement of Analysis Technique for Protection Coating*

井上晃一\*  
Koichi Inoue  
佐々木 肇†  
Hajime Sasaki  
日坂隆行†  
Takayuki Hisaka

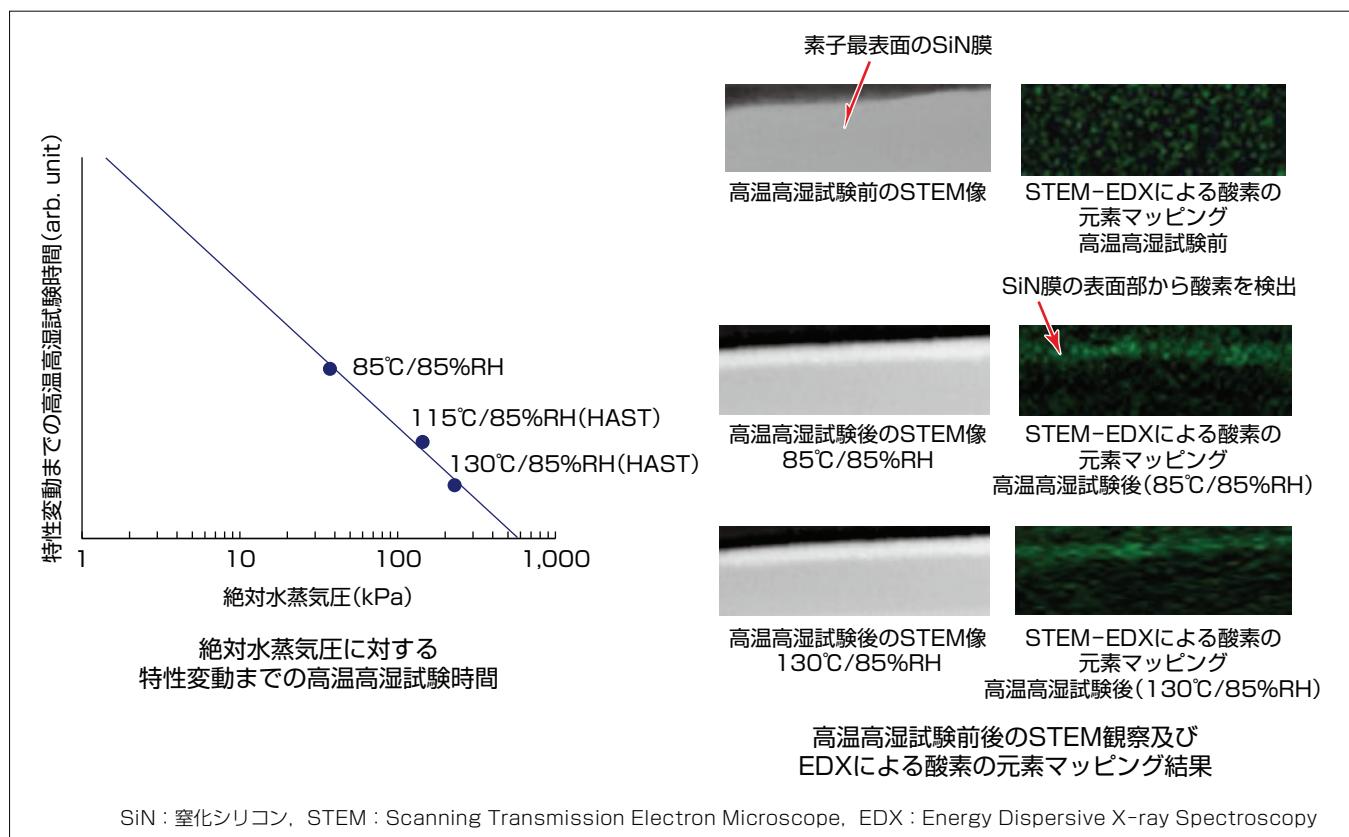
## 要旨

光半導体素子は、温湿度環境による特性変動を防止するため、ハーメチックパッケージに封入されることが多い。しかし、データセンターでは封入せずに使用されることが主流になり、素子そのものの耐湿性の確保が不可欠になってきた。

素子を長期間使用したときの特性変動を見る目的で信頼性試験を実施しているが、この信頼性試験を製品の使用温湿度で実施すると数年単位の時間がかかることがあるため、条件を厳しくした加速試験を行うのが一般的である。ただし、本来の使用条件での変動メカニズムと異なる現象が現れた場合には加速試験にならない。そのため、試験後の素子を解析し、本来の使用条件での変動メカニズムと同一であることを確認する必要がある。

今回、開発中の光半導体素子の耐湿性を評価するに当たって、高加速試験(Highly Accelerated Stress Test: HAST)が適用できるか検証した。まず、素子が特性変動するまでの時間に関して、絶対水蒸気圧と相関があることが分かった。また、変動メカニズムに関して試験前後の素子を解析し、素子の保護膜最表面部の数nmが酸化することで体積が膨張し、応力が変化したことが特性変動の原因であることを明らかにした。この変動メカニズムはHASTである130°C/85%RH(Relative Humidity)の条件でも、一般に用いられる85°C/85%RHの条件と同一であった。

これらの結果、HASTが適用できることを実証できたため、今後の製品開発では信頼性試験の短期化が図れる。



## 絶対水蒸気圧に対する特性変動までの高温高湿試験時間と試験後の解析結果

光半導体素子の高温高湿試験でHASTを検証し、特性変動までの時間と絶対水蒸気圧に相関があることが分かった。加速試験として適用できるか判断するため、試験後の素子を解析した。変動メカニズムは高加速条件である130°C/85%RHでの試験でも、一般に用いられる85°C/85%RHの条件と同一で、素子の保護膜最表面部の数nmが酸化することで体積が膨張し、応力が変化したことが特性変動の原因であることを明らかにした。

## 1. まえがき

インターネット上のクラウドサービスやスマートフォンなどの移動体通信端末が普及することによって、日々増大する通信トラフィックに対応するため、光通信用半導体素子の需要が高まっている。情報化社会を支えるキーデバイスとして、光半導体素子の使用に際して現れる経時的变化及び変動の要因を把握することはますます重要になっている。

光半導体素子の特性に影響を与える要因として、温度、湿度、電流、電圧が挙げられる。このうち温湿度の環境条件に対する特性変動を防止するためには、ガラス、セラミックや金属などを用いたハーメチックパッケージに封入して一定の条件に保つ方法が採られることが多い。しかし、データセンターではハーメチックパッケージに封入せずに使用されることが主流になりつつあり、光半導体素子そのものの耐湿性の確保・検証が要求されるようになってきた。

素子を長期間使用したときの特性変動を見る目的で信頼性試験を実施しているが、この信頼性試験を製品の使用温湿度で実施すると数年単位の時間がかかることがあるため、条件を厳しくした加速試験を行うのが一般的である。光半導体素子に要求される信頼性規格として、Telcordia GR-468-CORE issue2<sup>(1)</sup>が用いられることが多く、三菱電機もそれに準拠した試験を長年行ってきた。しかし、そのTelcordia GR-468-CORE issue2の仕様に準拠した温湿度条件(85°C/85%RH)での高温高湿試験でも、試験時間は数千時間も必要で、製品開発スケジュールでネックになり得る。市場で起こる特性変動を検証するには、これらの時間を短縮する必要がある。

本稿では、開発中の光半導体素子で検証した、高温高湿試験の時間短縮と、試験で変化した耐湿性保護膜を評価するために用いた解析技術について述べる。

## 2. HAST条件の適用とその加速性

### 2.1 HAST条件の適用

今回、Telcordia GR-468-CORE issue2の仕様に準拠した85°C/85%RHでの高温高湿試験に対して、更なる加速試験としてHASTの適用を検討することにした。HASTの導入に当たって特に注意するべきことは、本来の使用環境での変動メカニズムと異なる現象が現れた場合には、加速試験にならないことである。

今回は、HASTの温湿度条件として、絶対水蒸気圧の変化量を大きく取るために温度は115°C及び130°Cの2条

件、湿度は85%RHの1条件で検証することにした。**表1**に温湿度環境に対する絶対水蒸気圧を示す。温度を上げるとともに絶対水蒸気圧も上がり、HASTの条件では大気圧(101.3kPa)を超えてくることが分かる。

### 2.2 HAST条件の加速性

**図1**にHAST試験槽を示す。水を加熱して発生させた水蒸気を更に加熱し、ファンによる攪拌(かくはん)と弁での圧力調整で高温高湿の環境を作り出す一槽式装置を用いた。**図2**に絶対水蒸気圧に対して、光半導体素子の特性が変動するまでの高温高湿試験時間をプロットしたグラフを示す。Telcordia GR-468-CORE issue2に準拠した85°C/85%RHでの試験結果と合わせた計3条件に対して評価した。その結果、特性変動が起きるまでの試験時間を絶対水蒸気圧のべき乗でプロットすると相関があることが分かった。

表1. 温湿度環境に対する絶対水蒸気圧

温湿度環境	絶対水蒸気圧(kPa)	
55°C/85%RH	13.3	従来条件
65°C/85%RH	21.3	
85°C/85%RH	49.1	
115°C/85%RH	143.0	HAST条件
130°C/85%RH	229.0	

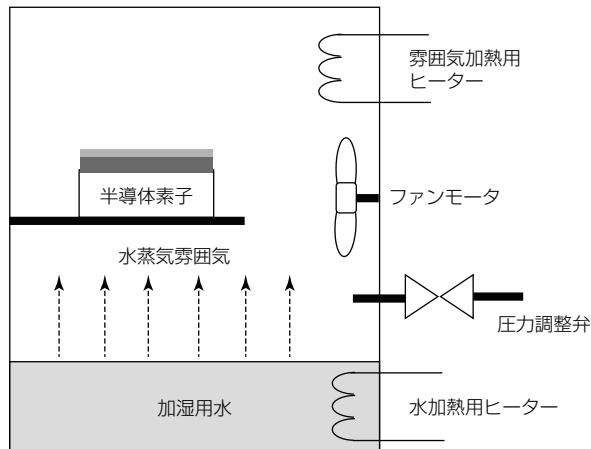


図1. HAST試験槽

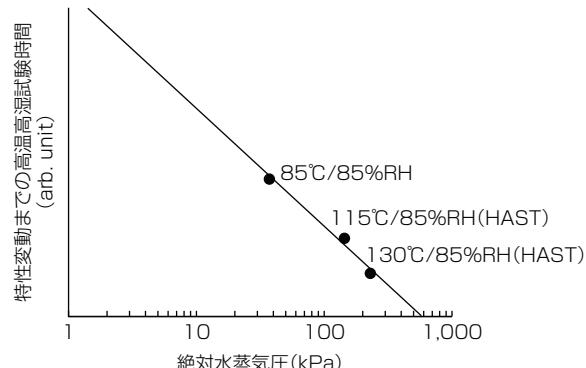


図2. 絶対水蒸気圧に対する特性変動までの高温高湿試験時間

### 3. 試験後の解析手法と解析結果

#### 3.1 試験後の解析手法

高温高湿試験の結果はHAST条件でも加速性が得られていることを示唆する結果になったが、その結果が妥当であると判断するためには、試験前後の光半導体素子を解析し、従来の試験条件と同じ変動メカニズムであるかを確認する必要がある。また、温湿度環境で現れる変動メカニズムの知見を得ることも、今後のデバイス開発、プロセス条件の決定や工程管理技術などの改善を進めていくために重要であると考えられる。

当社はこれまで製品開発での信頼性試験で発生した変動に対して解析調査を行い、その原因を明らかにしてきた。解析調査では、対象とする材料や推定した変動メカニズムによって様々な装置や手法を適切に使い分けることが重要になる。

今回は絶対水蒸気圧に対して加速性があることから、光半導体素子の最表面の保護膜として用いたSiN膜が吸湿によって酸化することで体積が膨張し、応力が変化したのではないかと変動メカニズムを推定した。そこで、最表面のSiN膜を走査透過型電子顕微鏡(STEM)で観察し、従来行ってきた元素分析方法であるエネルギー分散型X線分析(EDX)及び、電子エネルギー損失分光法(Electron Energy Loss Spectroscopy : EELS)による組成分析と化学結合状態の評価を行った。図3にSTEM、EDX、EELSの測定系を示す。STEM観察は図のように集束イオンビーム(Focused Ion Beam : FIB)やイオンミリングなどで薄片に加工した固体試料に電子線照射し、透過した電子線を検出して像を得る観察方法である。EDXは試料に電子線を照射した際

に、試料から放出される特性X線のエネルギーを検出する。特性X線のエネルギーが元素固有の値であるため、試料の構成元素を特定できるが、化学結合状態を含めた組成までは識別できない。一方、EELSは、電子線が透過した際に試料内の電子を励起するために失ったエネルギーを計測することで、組成、構造、電子状態を解析する手法である。EELS測定時の電子ビーム径は0.2nmであり原子1個レベルの分解能でサンプルの状態を分析できる。内殻励起とプラズモン励起の多重散乱効果を抑制するため、サンプルの厚さはできるだけ薄い方が良く、表面ダメージがなければ30nm程度が理想であるが、今回用いたサンプルはFIB加工の精度やダメージを考慮し、サンプルの厚さは約100nmとした。

#### 3.2 STEM観察とEDXマッピングによる解析

高温高湿試験前のSiN膜と高温高湿試験を行った後のSiN膜に対してSTEM観察及びEDXマッピングで解析した結果を比較した。図4に酸素の元素マッピング結果を示す。図から、光半導体素子最表面にあるSiN膜のさらに表面部で、試験後にSTEM像でのコントラストが変化しており、かつその部分からは酸素が検出されることが明らかになった。この変動は、HAST条件である130°C/85%RHでの高温高湿試験でも、Telcordia GR-468-CORE issue2に準拠した85°C/85%RHでの高温高湿試験と同じ変動であることが確認できた。このことから、HASTが適用できることを実証できた。今後、開発品の耐湿性検証の効率化に大きく寄与できる。

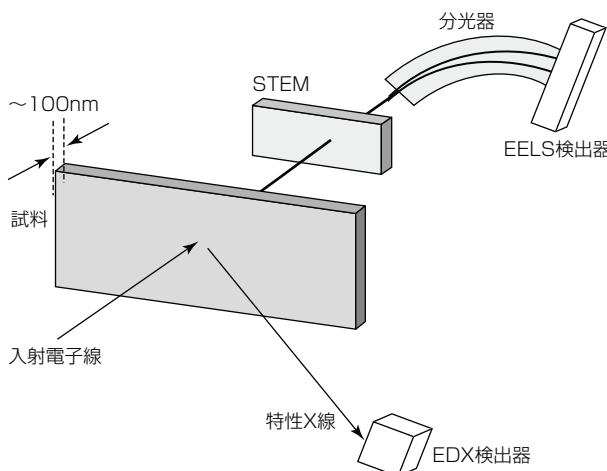


図3. STEM, EDX, EELSの測定系

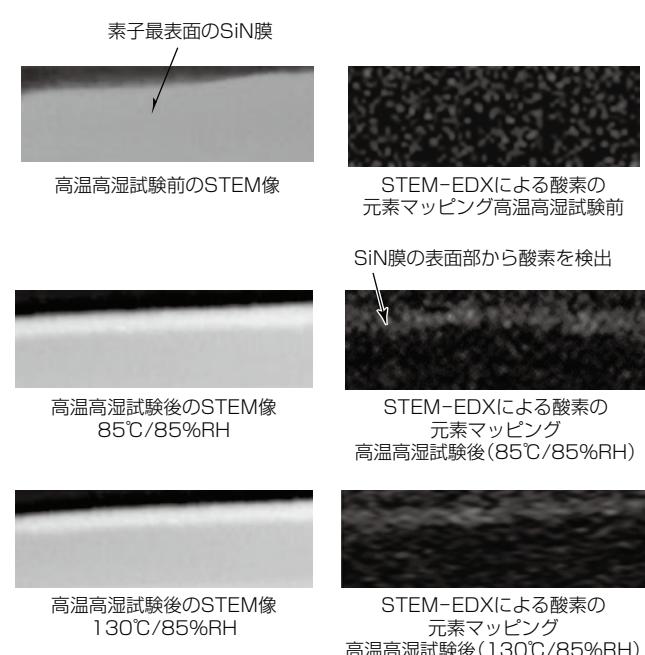


図4. STEM観察及びEDXによる酸素の元素マッピング結果

### 3.3 EELSによる解析

EDX分析によって高温高湿試験後のSiN膜の最表面部に酸素が存在することが明らかになったが、その部分の組成と化学結合状態を詳細に調査するため、EELSによる解析を実施した。図5に高温高湿試験(130°C/85%RH)後のSiN膜のSTEM拡大像及びEELS分析箇所を、図6にSTEM-EELSによる点分析のスペクトルをそれぞれ示す。分析箇所は図5の分析点1及び分析点2である。このデータは測定したデータからノイズを差し引くことで求められる最終的なスペクトルである。表層から4nm以上内側の分析点1はSiNである<sup>(2)(3)</sup>。106eV付近にL<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>殻の吸収によるピークが、160eV付近にL<sub>1</sub>殻の吸収によるピーク

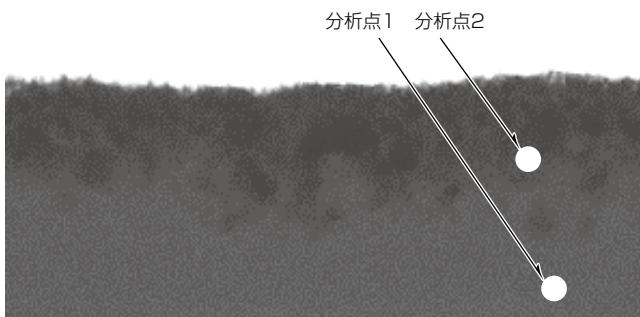


図5. 高温高湿試験(130°C/85%RH)後の  
SiN膜のSTEM拡大像及びEELS分析箇所

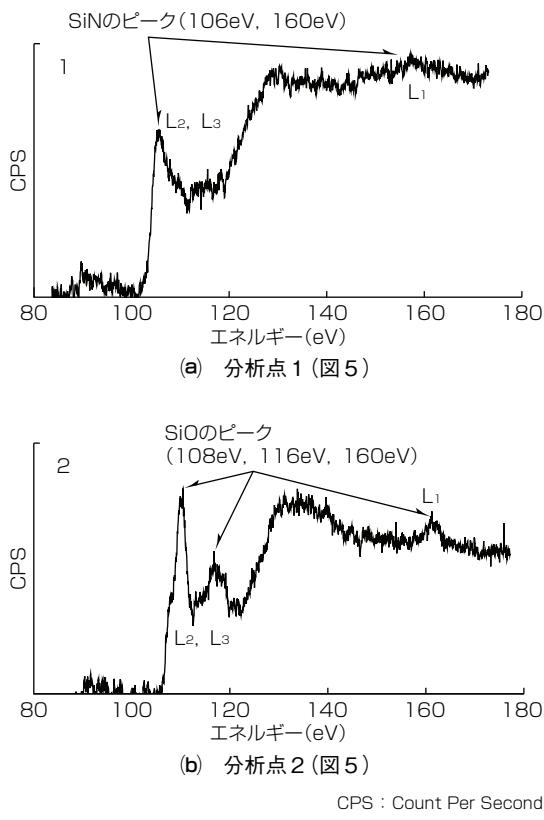


図6. 高温高湿試験(130°C/85%RH)後のSiN膜の点分析の結果

が見られる。106eVはSi(ケイ素)-N(窒素)結合によるものである。一方で、表層から2~3nm程度の分析点2はSiO(酸化シリコン)である<sup>(2)(3)</sup>。108eVと116eV付近にL<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>殻の吸収によるピークが、160eV付近にL<sub>1</sub>殻の吸収によるピークが見られる。EDXでは元素分析しかできないが、EELSを用いた化学状態の分析によって、高温高湿試験によってSiN膜の表層から2~3nm程度の領域が酸素と結合してSiOへと変質し、4nm以上内部はSiNのまま変質していないことがより明確になった。SiN膜の一部がSiOに変化したこと、体積膨張が起きた結果として光半導体素子が受ける応力が変化し、特性変動が起きたと考えられる。

EELS分析によって、高温高湿試験でSiN膜の平坦(へいたん)部は、表面から2~3nmの領域が酸化してSiOに変質することが明らかになったが、SiN膜の成膜が2段階で行われ、表面に露出した成長界面ができた部分では、成長界面も高温高湿試験で酸化しやすいことが判明した。図7に高温高湿試験(130°C/85%RH)後のSiN膜の成長界面部でのSTEM拡大像を示す。図7の分析点Aを含む側が1層目SiN膜、分析点Cを含む側が2層目のSiN膜で、分析点Bが成長界面部になる。図8に分析点A, B, CそれぞれのEELSによる点分析のスペクトルを示す。図のように成長界面であるB地点は表層部と同様に酸化してSiOになっている。一方で成長界面から4nm程度離れた分析点A及び分析点CではSiN膜のままで、酸化はしていなかった。このように、高温高湿試験によって、表面及び露出した成長界面からSiN膜が酸化していくことが明らかになった。この知見を用いてSiN膜の加工方法と加工条件を最適化し、露出した成長界面を減らすことで耐湿性を更に向上させることが可能であると考えられる。

今回、数nmオーダーの微小領域に対して詳細に解析を行うことで、保護膜の表面からの酸化を捉えることができた。今後、光半導体素子の解析では、更に微細な原子サイズの解析を行える技術が必要になってくるため、より一層の解析技術の向上に努める。

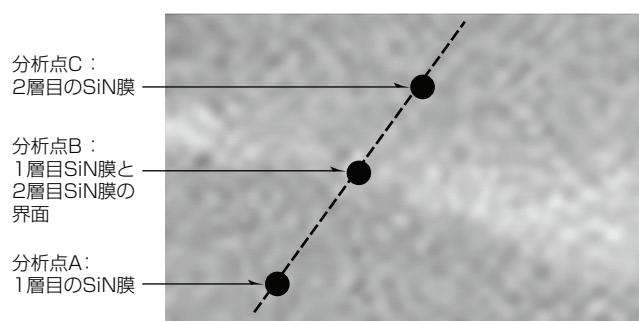


図7. 高温高湿試験(130°C/85%RH)後のSiN膜の  
成長界面部でのSTEM拡大像

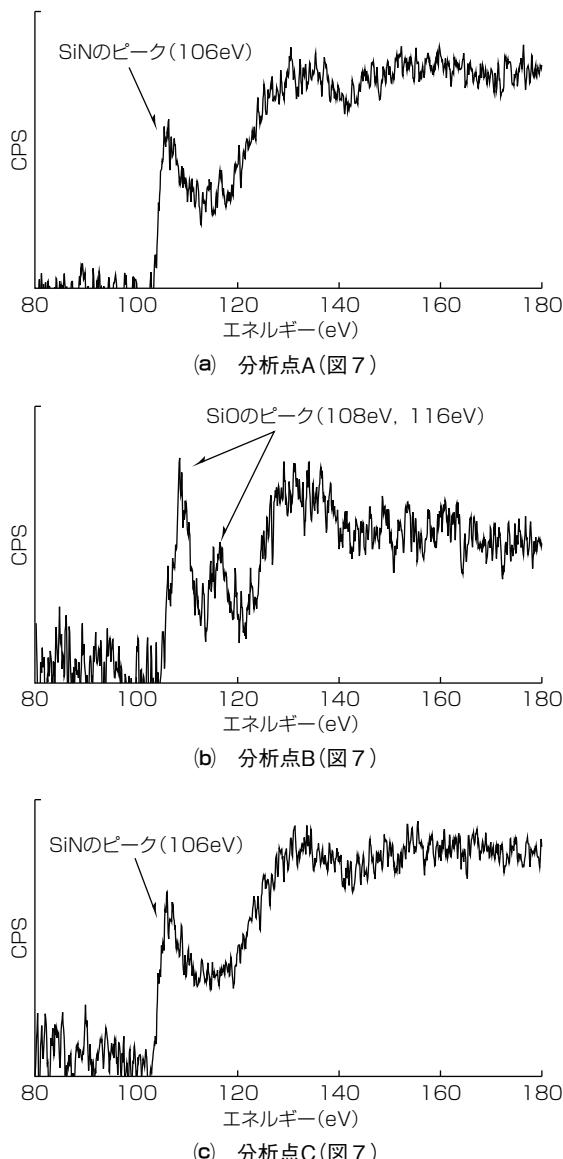


図8. 高温高湿試験(130°C/85%RH)後の保護膜界面のEELSによる点分析結果

#### 4. むすび

今回、開発中の光半導体素子の耐湿性評価を行うに当たって、HASTが適用できるかどうかを検証した。その結果、130°C/85%RHでの高温高湿試験でも、Telcordia GR-468-CORE issue2に準拠した85°C/85%RHでの高温高湿試験と光半導体素子の変動メカニズムが同じであることが確認でき、妥当な加速試験として扱えることを実証した。この条件を用いて、高温高湿試験時間を短縮することで、今後の製品開発での信頼性試験の短期化が図れる。

今回の試験前後の素子の解析に当たっては、数nm程度の微小な領域まで観察することで変動メカニズムの同一性を確認した。このように光半導体素子の解析ではnmオーダーの分解能を持つ観察・解析を行う解析設備と技術が必須になっている。

当社は社内で豊富な試験技術及び分析・加工技術を持っており、このような試験から解析までを迅速にできる。今回得られた知見は、今後の解析評価に生かしていく。

#### 参考文献

- (1) Telcordia : Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment, GR-468 Issue Number 02 (2004)
- (2) Maigné, A., et al. : Review of recent advances in spectrum imaging and its extension to reciprocal space, J. Electron Microscopy, **58**, No.3, 99~109 (2009)
- (3) Park, J., et al. : Electron Energy Loss Spectroscopy Characterization of TANOS(TaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si)Stacks, Microsc Microanal. 2013, **19**, Suppl 5, 109~113 (2013)

## 複写機用カラーA3サイズ 密着型イメージセンサ“WFシリーズ”

Color A3-size Contact Image Sensor "WF Series" for Copier

白木 徹\*  
*Toru Shiraki*

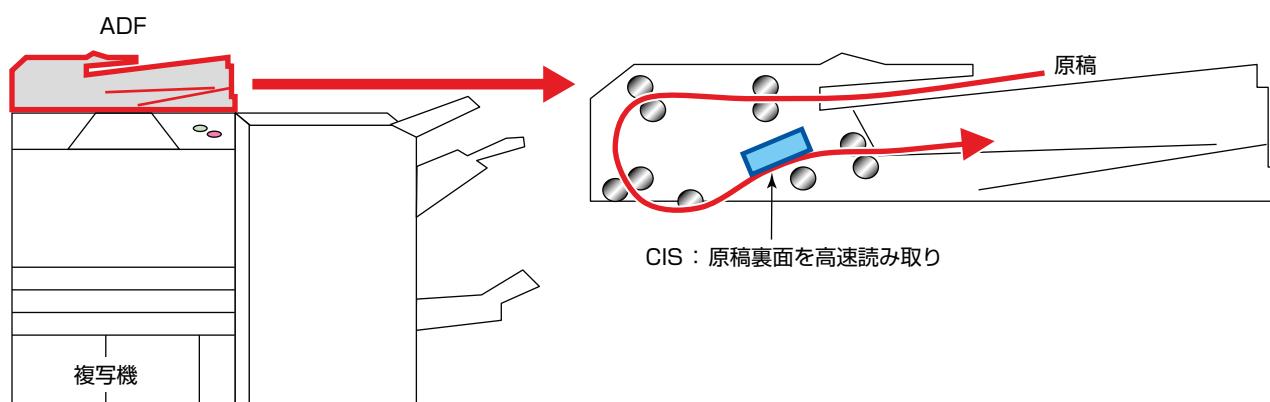
### 要旨

三菱電機の密着型イメージセンサ(Contact Image Sensor : CIS)事業は1986年にファクシミリ用途の製品として量産を開始し、2020年で35周年を迎えた。その製品群は複写機、金融端末(紙幣の真贋(しんがん)判別用途)や、産業用オンライン検査機(印刷物の表面検査用途等)等に用いられている<sup>(1)(2)</sup>。

今回開発した“WFシリーズ”は、複写機の原稿裏面読み取り用途に用いられるカラーA3サイズのCISである。複写機の蓋の部分に当たる自動原稿送り装置(Auto Document Feeder : ADF)の原稿搬送経路の途中に収納される。ADFの下にある原稿のおもて面を読み取る別のイメージセンサと合わせて原稿の両面を原稿搬送1回で同時に読み取る機

能を成立させるためのキー部品であり、原稿裏面の読み取り速度の向上と原稿の折れ曲がり等の抑制に貢献している。複写機裏面読み取り用途としては、画質に加えて、ADFの狭い空間に収めるためのコンパクト性と高速性が必要になる。基本的に必要な機能については標準開発として多くの複写機に標準適用できるものを用意し、複写機メーカーそれぞれの差別化と使用方法に応じて、一部仕様についてカスタム対応している。

近年は市場の要求として、性能は据置きのまま、コスト低減が強く求められており、WFシリーズは、それを実現した。



複写機裏面読み取り用CISの用途



複写機裏面読み取り用CISのWFシリーズ

### 複写機裏面読み取り用CIS“WFシリーズ”的用途とその外観

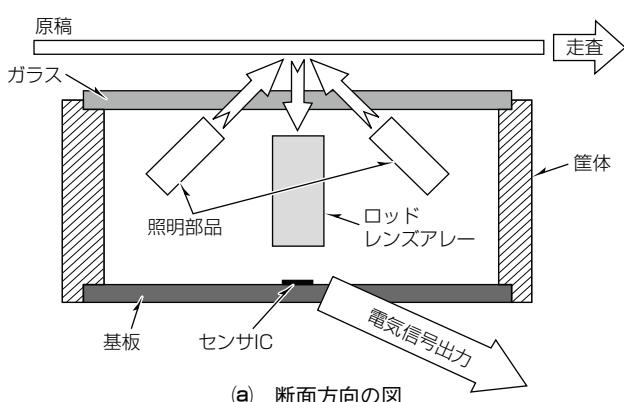
複写機裏面読み取り用CISの最新機種WFシリーズは、複写機のADFに搭載され、原稿裏面の高速読み取りと折れ曲がり等の抑制に貢献している。WFシリーズは2018年12月から量産開始している。

## 1. まえがき

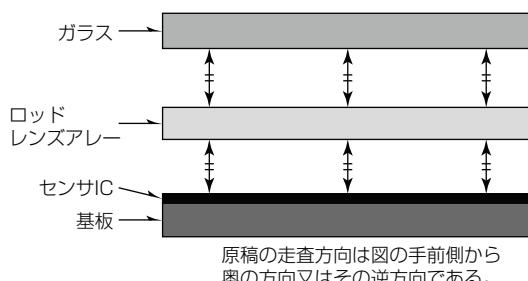
家電量販店で販売されているコンシューマー向けスキャナ用途のCISは読み取り幅約200mmのものが多い。一方、オフィス向けに用いられる複写機の裏面読み取り用CISは、読み取り幅約300mmが主流であり、例えば速度であればコンシューマー向けの約5倍以上と要求性能が高い。300mmにわたって画質を一定品質以上にするためには、部品と製造方法に留意すべきところがある。本稿では、そのために工夫した点について述べる。

## 2. CISの構造と原理

図1にCISの部品構成を示す。図1(a)は、CISの断面方向、図1(b)は長手方向の図になる。ガラス面上を原稿が通過する際に、CISに内蔵する照明部品によって原稿を照射し、その反射光がロッドレンズアレーを通過して、基板上に搭載されるCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)ラインセンサ(以下“センサIC”という。)上に結像される。センサICは図1(b)であれば長手方向に1チップ当たり約10~20mmの幅のICが読み取り幅分一直線に並べられている。センサIC上にある画素のサイズはCISで読み取りたい精度によって100~600dpi(dot per inch : 600dpiなら42.3μm角のサイズ)のものを使い分ける。また、読み取り幅は原稿のサイズによって、複写機用途であれば、



(a) 断面方向の図



(b) 長手方向の図

図1. CISの部品構成

A3サイズの約300mm、A4サイズの約200mmの2通りがある。その読み取り幅全体に画素が1列、又はカラーであれば図2の画素配列例のようにRGB(Red, Green, Blue)で各1列の3列で配置される。画素はフォトダイオードで構成されており、ここで光電変換された電気情報がセンサICからアナログ電気信号として出力され、基板上に配置されたAFE(Analog Front End)ICによってアナログ/デジタル変換やデジタル画像処理が行われ、デジタル電気信号としてCISから出力される。原稿の反射光を集光するロッドレンズアレーは正立等倍光学系であり、センサICとロッドレンズアレーの距離とロッドレンズアレーと原稿の距離が等しい場合に最も焦点が合う。おもて面を読み取るイメージセンサのレンズに比べて小型であり、複写機裏面読み取り用CISに必要なコンパクト性に適しているが、一定レベル以上の焦点深度を確保できる範囲は狭い。ガラス面からのある高さを基準に±0.15~0.30mm程度と狭く、原稿がCISに走査される際の高さがこの範囲を超えると読み取った画像がぼやけていくという弱点がある。例えば、図3のようにA3幅(300mm)で、筐体(きょうたい)の反りに応じてガラスと基板が反っていて、中央にあるロッドレンズが反りなく貼り付けられている場合、センサICとロッドレンズアレーの距離とロッドレンズアレーと原稿の距離が中央と端部で異なり、中央部と端部の焦点深度特性に偏差が生じて、読み取り幅全域での焦点深度特性確保に支障を来す。

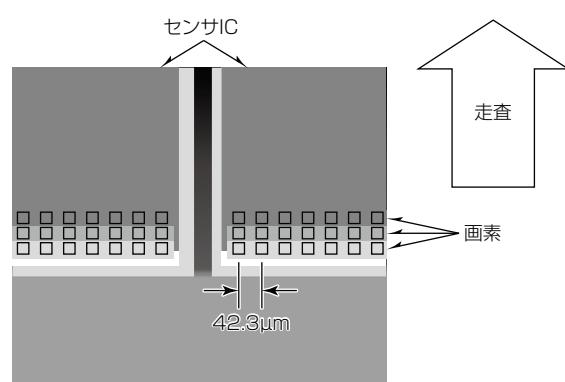
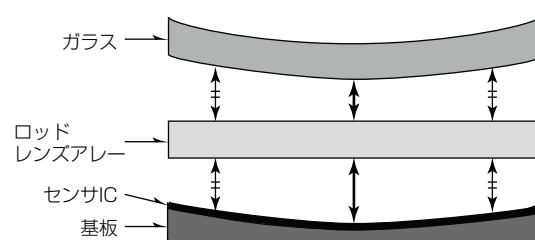


図2. センサICの画素配列例

図3. 筐体の反りにガラスと基板が影響する例  
(反りによって、中央部のレンズ前後の距離がずれている)

### 3. WFシリーズの開発

今回、複写機用裏面読み取り用途CISとして、新機種のWFシリーズを開発した。WFシリーズの主な仕様を表1に示す。

この機種の開発に当たって、高性能と低コストを両立させるため、センサICや信号処理用IC等の電気部品開発と併せて、組立てに関わる製造プロセスと機構部品開発を行った。その中で、イメージセンサとしてキーになる機能である、焦点深度と照明特性の2点に関連した開発内容について述べる。

#### 3.1 焦点深度の長手方向の安定化

従来の複写機裏面読み取り用CISでは、焦点深度の長手方向の安定化を実現するために、図4のようにロッドレンズ、ガラス、基板を固定する柱になる筐体自体の反りを抑

表1. WFシリーズCISの主な仕様

項目	仕様	備考
撮像素子(センサIC)	CMOSラインセンサ	
カラー読み取り	画素の上にRed, Green, Blueのカラーフィルタ塗布	
センサ画素間隔	600dpi(42.3μm)	
読み取り幅	309mm	
読み取り画素数	7296画素×3ライン	走査方向にRed, Green, Blueの3色を配列
読み取り速度	110μs/ライン	高速対応の場合、AFE IC追加によって80μs/ラインまで対応
焦点深度保証範囲 照明特性保証範囲	焦点中心位置から±0.15mm	ある特性値を保証する範囲
データ出力方式	10ビット長デジタル出力	
データ転送方式	LVDS又はV-by-One <sup>(注1)</sup>	センサ基板設計時に選択
シリアル通信方式	SPI準拠	
電源	5V×1.1A	センサ本体、照明用の合計
外形	331×32×20(mm)	・複写機に取り付けるための部品を除く ・基板上のコネクタ含む
質量	260g	

SPI : Serial Peripheral Interface

LVDS : Low Voltage Differential Signaling

(注1) V-by-Oneは、ザインエレクトロニクス(株)の登録商標である。

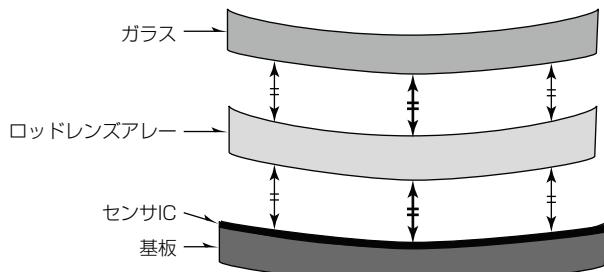


図4. 筐体の反りに合わせて性能維持する際の組立て例

制したものを作成し、その筐体にガラス、基板、ロッドレンズを筐体の反りに合わせて貼り付けることで、読み取り幅の中央、端の焦点深度特性の差を抑制していました。ただし、この製法では筐体コストが高くなるため、コスト低減と性能維持の両立を目指す組立て方法を見直しを行った。

具体的には図5のように、筐体とガラスの間、筐体と基板の間にそれぞれ筐体の反りの部分を埋めるように樹脂を充填し、その上からガラス、基板を筐体にある基準面に対して水平に貼り付ける。ロッドレンズもガラス、基板と同様に中央に水平に貼り付けることで、焦点深度に関わる部品が図1(b)のような長手方向に理想的な位置にそろうことになり、長手方向の焦点深度の中央、端部の差がより抑えられる方向の組立てが可能になる。

この組立て方法を実現するに当たって、実際に樹脂を筐体の反りに合わせて充填するためには、試作筐体での実機組立て検証の結果、

(1) 筐体の形状(反り、高さ)の高精度な測定

(2) 樹脂特性(硬化収縮など)の把握

が必要と判明した。実機検証結果を踏まえて、組立て装置での筐体の把持方法や筐体の反りや高さの測定方法の見直し、反りを埋める樹脂の塗布時の振る舞いについての検証を繰り返し行い、この方式の技術確立に至った。そして、この組立て方式の確立によって、従来機種で規定していた300mmという長さの中で約0.1mmという筐体の反りに対する厳しい仕様は倍の約0.2mmまで緩和できたため、金属板の抜き、曲げによって形成した安価な筐体を開発し、

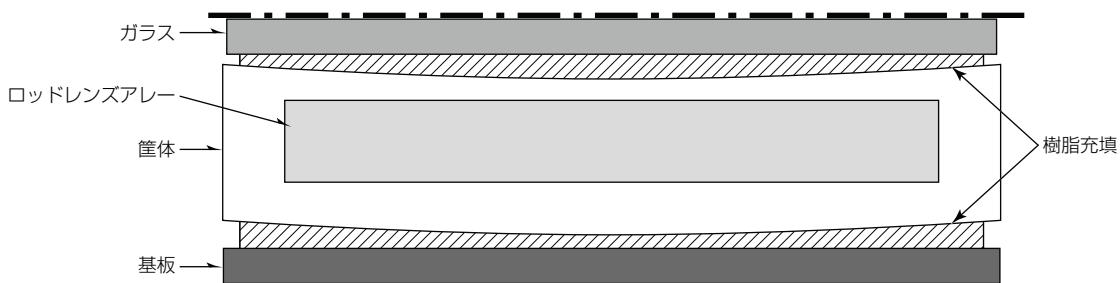


図5. 筐体の反りを樹脂で充填してキャンセルした際の組立て例

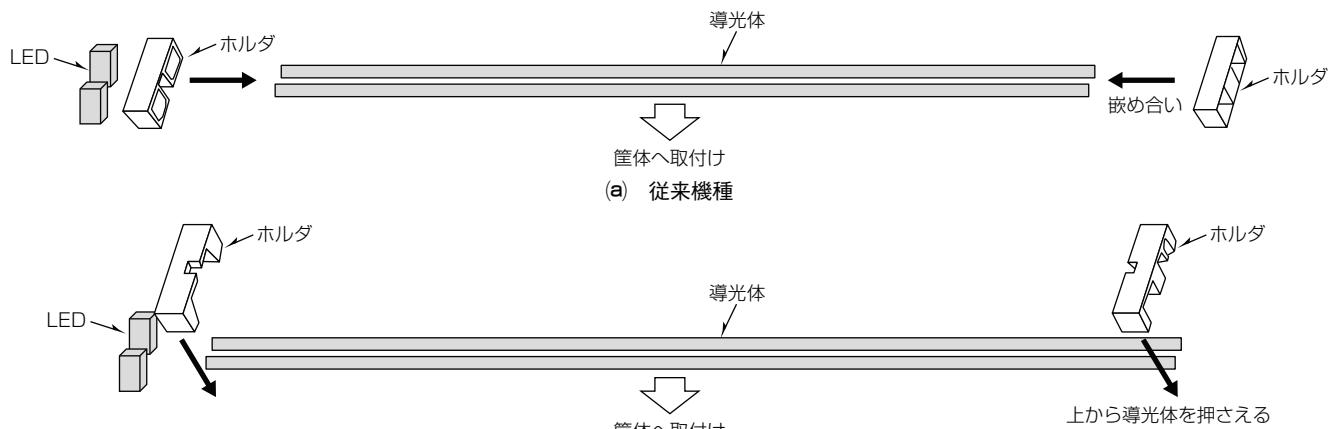


図6. 照明部品の組立て方法

筐体の部材コストを従来機種比40%に低減できた。

この製造プロセスと筐体開発によって、部材コストを低減した上で、焦点深度に関わる部品の組立て精度の向上の実現に至った。

### 3.2 照明部品の開発

照明部品については、図6(a)のように、従来機種は導光体をホルダに嵌(は)めるという形で組立てを行っていた。導光体の端部を反射率の高い白い部品で覆い、CIS端部の照明性能を確保するという特性確保のための構成であったが、装置での組立てに適さず、従来機種では人手での組立てになっていた。一方、この照明部品組立ての前後工程では装置での組立てによる省人化を実現していた。

今回のWFシリーズの開発では、照明部品の装置での組立てを実現することで、主要組立て工程を全て装置組立て化し、省人化を進めて、組立て精度の安定と加工費の抑制を目指した。

装置での組立てを念頭に図6(b)のように導光体の上からホルダを押さえ付ける形に設計を行った。この構成であれば、装置での組立て時に、筐体の上に導光体、ホルダと上から順に積み上げての組立てが可能であり、装置での組立てによる省人化が可能である。この設計見直しによって、従来機種は導光体端部がホルダで全周を覆っていたのに対して、導光体の下側がホルダで覆われなくなる。導光体端部はLEDによる光が入射直後の部分で、導光体の形状によって十分に光を分散・均一化できる端部以外の箇所に比

べて光の制御が難しく、照明の均一性という照明部品の必要性能の中では最も重要かつ難しい部分である。

端部均一性の確保のため、照明シミュレーションによる照明分布解析と設計したものを試作しての実機検証によるフィードバックを繰り返すことによって、導光体自体の形状と周辺部品の形状の最適化を行い、最終的にCIS端部も従来機種同等の照明特性を維持することに成功した。また、装置での組立てが可能になったことによって、組立て時間を約15秒削減できた。さらに、照明特性に関わる部品の組立て精度が向上したことによって、最終電気試験の直行率が従来機種に比べて約4%改善し、生産性も向上した。

## 4. むすび

当社の複写機裏面読み取り用カラーA3サイズの密着型イメージセンサの最新機種であるWFシリーズの開発について述べた。この機種は今回述べた開発を経て、2018年の12月から量産開始をしている。今後開発を計画している次機種については、WFシリーズでの開発成果を踏まえて更なるコスト削減と性能向上を実現し、より多くの複写機に採用されることを目指していく。

### 参考文献

- (1) 太田 章, ほか: 密着型イメージセンサ, 三菱電機技報, 81, No.8, 565~568 (2007)
- (2) 複写機用カラーA3-CIS“WEシリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.1, 15 (2016)



三菱電機グループは、半導体・デバイスのNEXTを創り続けています

# 半導体・デバイスサイト

三菱電機グループは、電力の高効率な制御を担うパワー モジュールや大電力デバイスを始めとして、光通信機器に求められる性能を先取りする光デバイス、無線や携帯電話から衛星通信までをカバーする高周波デバイス、情報のイ

ンタフェースを向上させるTFT(Thin Film Transistor)液晶モジュールなど、最先端の半導体・デバイスを提供しています。“半導体・デバイスサイト”では、関連製品・サービスについて詳細にご案内しています。

<https://www.mitsubishielectric.co.jp/semiconductors/index.html>

## コンテンツ



### アプリケーション

当社のパワーモジュールやデバイスをアプリケーション別にご紹介しています。

モーションコントロール／家電／再生可能エネルギー／鉄道車両・電力応用ほか



パワーデバイス



高周波デバイス



光デバイス  
光ファイバー通信、  
ディスプレイ用光源など



### 製品情報

当社製品をカテゴリー別にご紹介し、特長や用途などを掲載しています。

パワーモジュール／大電力デバイス／ドライバ IC・センサほか



パワーモジュール  
SiC-MOSFET



GaN(窒化ガリウム)  
高周波デバイス



### デザイン・サポート

パワーモジュール損失シミュレータや各種 アプリケーションノート、信頼性情報、技術論文などを掲載しています。

また、展示会・イベントへの出展情報などもご覧いただけます。



パワーモジュール損失  
シミュレータ メイン画面



▶詳しくはWEBサイトでご覧いただけます。

三菱電機 半導体・デバイス

検索