

3 メトロ・アクセスネットワーク系通信デバイス

1波200Gbps級を目指したメトロ・アクセス系高速光通信デバイスの開発

ネットワーク（以下、NW）の大容量化、高速化がますます進んでおり、800Gbpsも視野に入りつつある。そのようなNWを支える通信機器の開発も進んでいるが、機器の小型化、および低消費電力化、ひいてはCO₂排出量削減が重要な課題となっている。NTT デバイスイノベーションセンター（以下、DIC）は、この課題の解決に役立つ研究開発に取り組み続けている。

データ通信の増加に伴い増加する消費電力やCO₂排出量

世の中を流通するデータの量が急速に増加し続けている。その通信ニーズに応えるため、光NWの広帯域化・高速化が進んでおり、最大データ転送速度が400Gbpsに達するNWの普及が本格化している。さらには「Beyond 400G」とも表現される次世代の光通信として、800Gに関する技術開発も進んでいる。

ただし、1波長で400Gbpsを実現できる光トランシーバーは存在しない。そのため現状では1波長100Gbpsのチャンネルを多重化し、4チャンネルで400Gbpsを実現してい

る。800Gではさらに倍の8チャンネルが必要になる計算であり、デバイスの大型化、消費電力の増加、それによるCO₂排出力の増加が問題となる。

1波長で200Gbpsを実現する高出力デバイスの研究開発

「我々は1チャンネルあたりのデータレートを向上させる研究開発を続けており、これまでに1波長で100Gbpsの処理を行える光通信デバイスを実現してきました。現在はさらに1波長で200Gbpsの処理を行えるデバイスが要求されている状況です。そこで伝送フォーマットは4-PAMのまま baud rate を50から100に上げ、4チャンネルで800Gを実現できるデバイスの研究開発を進めています。実用化すればチャンネル数をこれまでの半分に抑えることができるため、消費電力の低減や、光トランシーバーの小型化に貢献できると考えています。」（金澤氏）

4-PAMは4つの強度レベルにより2ビットを表



NTT デバイスイノベーションセンター
スマートコネクショントラフィックプロジェクト
主任研究員 金澤 慈氏

現する伝送フォーマットだ。そのためデジタル信号とアナログ信号の変復調を1秒あたり何回行うかを示す baud rate が50の場合の転送速度は100Gbps、 baud rate が100の場合の転送速度は200Gbpsということになる。

3dB帯域で60GHz以上の広帯域、+6.0dBm以上の高出力が必要に

本研究開発は、技術の適用先としてメトロ・アクセス系NWを想定している。そのため、100kmを越えるコアNWほどの長距離ではないものの、10km以上の伝送距離に対応する必要があった。

「1波長で200Gbps、かつ10kmの通信が可能なデバイスを実現する

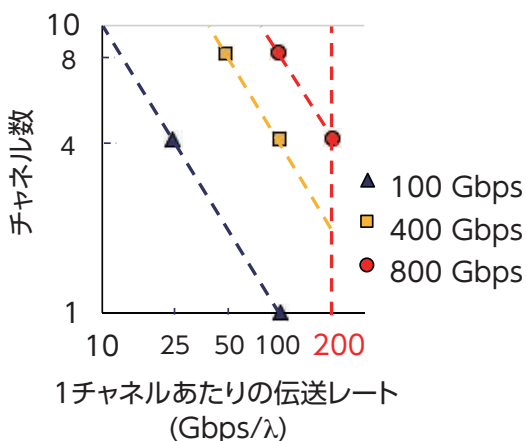


図1 データ転送レートとチャンネル数

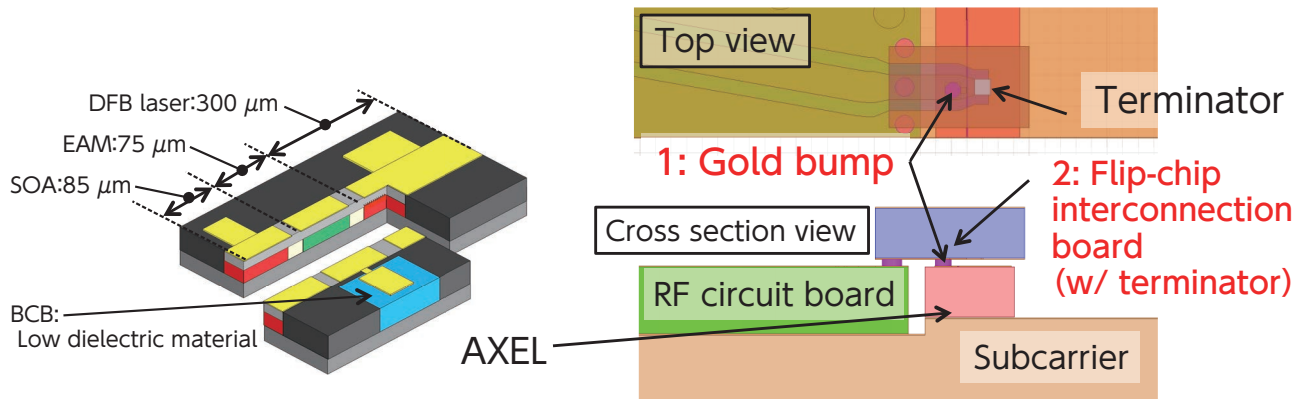


図2 AXELチップ(左図)、およびHi-FIT AXEL サブアセンブリ(右図)

には、3dB帯域で60GHz以上の帯域が必要です。この広帯域化の実現に必要な技術は2016年までに研究開発済みであり、電気信号を光信号に変調して送信するためのEML(Electro-absorption Modulator integrated with DFB Laser)というデバイスに適用済みです。この際のEMLの光出力は+4.5dBmでした。ところが我々の試算では、10kmの伝送に必要な出力は+5.3dBm以上です。そのため広帯域は維持しつつ、マージンを考慮して+6.0dBm以上の高出力化に取り組みました。」(金澤氏)

EMLは光を出力するDFB(分布帰還)レーザーと、電気信号に応じてその光を光信号に変調するEAM(電界吸収《EA》型変調器)を組み合わせているため、EADFBレーザーとも呼ばれている。

EMLの広帯域化を可能にしたのは、NTT研究所でHi-FITと呼んでいる独自技術であった。

広帯域への対応を可能にした実装方式“Hi-FIT”

Hi-FITはHigh frequency and integrated design based on Flip-chip Interconnection Techniqueの略称で

あり、チップを基盤上に実装する方式の1つと言える。

チップ同士を金のワイヤーで接続する、従来のワイヤーボンディングという方式では、そのワイヤーのインダクタンス(L)による帯域の劣化が問題となる。そこで最低でも250μmほど必要になるワイヤーと比較し、かなり小さい数十μmという薄さの金、および高周波に対応する配線板を組み合わせることにより、インダクタンスの影響を極力抑えるというのがHi-FITの概要だ。

実装方式自体は、配線板となるセラミック基板を光半導体チップの上部に反転して実装するため、フリップチップ(Flip-chip)ボンディングと呼ばれている。

「フリップチップボンディングの採用に加え、広帯域に対応できるようEAMと終端回路を含む配線板を一体で設計しました。EAMには寄生容量が存在し、周波数が高くなるほど抵抗(インピーダンス)が下がってしまいます。そこで終端回路にバランス良くインダクタンスを付与することにより、周波数が高くなるほどインピーダンスが上がるようにしました。これにより並列する回路全体では、広い周波数帯域に対してイ

ンピーダンスを適切に保つことができます。」(金澤氏)

増幅器を一体化し高出力を可能にしたAXELチップ

広帯域を実現するためのHi-FITに対し、高出力を実現するための鍵となったのが、こちらもNTT研究所の独自技術であるAXELであった。

AXELはSOA-assisted eXtended reach EADFB Laserの略称であり、前述のEADFBレーザーと、その出力レベルを増幅する光半導体増幅器SOA(Semiconductor Optical Amplifier)を一体化したデバイスを意味する。EADFBレーザーでは、電気信号を光信号に変調する際にEAMで光の損失が発生し出力レベルが低下するため、光を増幅するSOAも一体化した形で1つのチップに集積(図2)するというものだ。

EADFBレーザーの損失を補うことで高出力化を可能にするだけでなく、デバイスの小型化にも貢献する技術だ。この技術によるチップをAXELチップと呼んでいる。

AXELチップの広帯域化実現に向けた技術開発も容易ではなかった。特徴的な試行錯誤や工夫について、金澤氏は次のように述べている。

IOWN構想を具現化するデバイスの開発に取り組む
デバイスイノベーションセンター

「高出力であるだけでなく、広帯域であることも必要なので、EAMにおける帯域の劣化を抑える対策が必要でした。静電容量(C)が大きいかほど帯域が劣化しやすいので、静電容量を小さくすることに取り組みました。そのため、まずEAMの静電容量がなるべく小さく、かつ良好な光信号波形が得られる、75 μ mという数字を導きだしました。また、EAMの電極の下にBCBという誘電率の低い素材を敷き詰めました(図2の青い箇所)。周囲の素材(図2の黒い箇所)よりも誘電率を低くすることにより、実装に耐えうる電極サイズを維持しつつ、静電容量を小さくすることができました。」

AXELにHi-FITを適用

次に行われたのが、Hi-FITによりAXELチップを実装することで、広帯域と高出力を両立することであった。

「EMLにはHi-FITを適用済みでしたが、SOAまで集積したAXELチップにHi-FITを適用するには、新たにいくつかの課題を解決する必要がありますがありました。たとえばEAMはSOAとDFBレーザーの間に配置されるため、チップを大型化すること

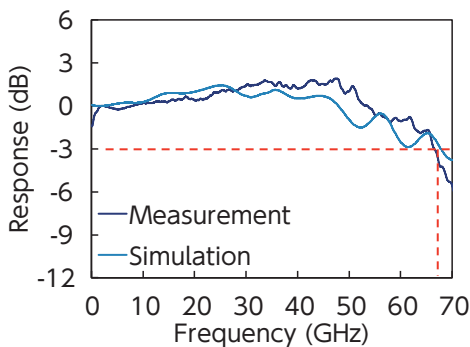


図4 Hi-FIT AXEL モジュールの特性 (シミュレーションと実測)

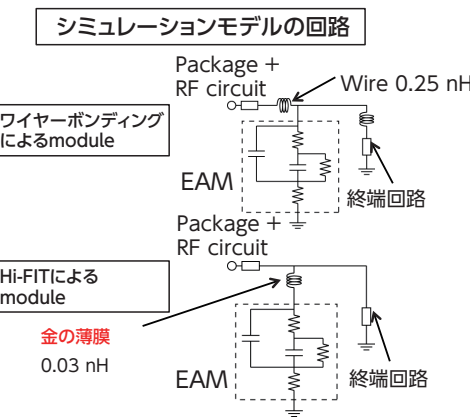
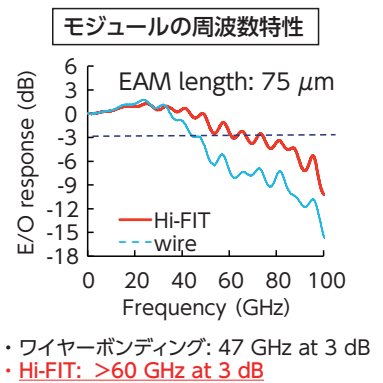


図3 シミュレーションモデルでHi-FIT AXEL モジュールの特性を確認

なくSOA、DFBレーザーへのクロストークが発生しないようにしつつ、広帯域に対応できるような回路設計が必要でした。」(金澤氏)

この取り組みにおいて、AXELチップをワイヤーボンディングとHi-FITによってそれぞれ実装した場合の特性を比較するため、シミュレーションモデルを構築した。その回路図を図3の左側に示す。図中でAXELチップに相当する「EAM」と高周波回路の接続部分に注目すると、ワイヤーボンディングでは0.25nH、フリップチップボンディングでは0.03nHと、インダクタンスが大幅に低減されているのがわかる。

シミュレーションを行った結果を図3の右側のグラフに示す。ワイヤーボンディングによるモジュール



では3dB帯域で、47GHz程度であるのに対し、Hi-FITによるモジュールでは、60GHzを超える3dB帯域が得られるという結果であった。

「ワイヤーボンディングの場合は配線部分のインダクタンスの影響が大きく、終端回路にインダクタンスを付与しても帯域が落ちてしまっていることがわかります。このシミュレーション結果から、AXELチップをHi-FITで実装する我々の技術が、従来技術と比較して10GHz以上の広帯域化を可能にする有力な技術であることを確認できました。」(金澤氏)

目標を大幅に上回る
+7.8dBmの高出力を達成

この後Hi-FIT AXELモジュールを試作し、2021年に実施した実験において、ほぼシミュレーションどおりの結果を得ている。その際に実測したHi-FIT AXELモジュールの特性を図4に示す。50GHzまでフラットな、安定した出力を実現できていることがわかる。

このモジュールで4-PAMによる214Gbpsの伝送を行った試験では、平均光出力パワーで+7.8dBmと、目標を1.8dB上回る高い出力を確

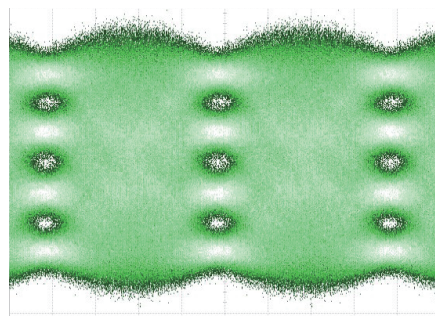
認した。ほぼエラーがないレベルまで誤り訂正を行うのに必要なオーバーヘッドが7%であったため、データ転送量は200Gbpsではなく214Gbpsとしている。

集積化と実測値に近いシミュレーションのノウハウが強み

本研究のように、実測値と変わらない高い精度で回路全体のシミュレーションを行えると、実際にデバイスを試作することなく試行錯誤を行うことが可能になる。そのためデバイスの開発期間短縮やコスト軽減につながる。

AXELチップのような集積に関する技術力に加え、局所的な回路だけではなく、モジュール全体のシミュレーションモデルを高い精度で構築するノウハウを有していることが、DICの大きな強みとなっている。

たとえば図3に示したシミュレーションモデルの回路図には、コンデンサやインピーダンス、インダクタンス以外に、矩形で表現されている部分がある。この部分は通常の回路図で解析することが難しいため、「3次元電磁界解析」を行うソフトウェアによりシミュレーションを行い、その結果を回路シミュレーターに組み込んでモジュール全体のシミュ



- Using 53-GHz 4th-order Bessel filter and 5-tap FIR filter (TDECQ filter)
- Target symbol rate: 7.8E-3 (7%-OH HD FEC)

図6 実測したEye波形

TECQ: 2.1 dB

ER(消光比): 5.3 dB
光出力の最も高いレベルと低いレベルの比率

OMA(外部光変調振幅): >+7.5 dBm
光レーザーがオフ/オン状態の出力レベルの差

レーションを行っている。

さらなる消費電力削減を達成

その後さらなる改善も進められている。その1例が消費電力の削減だ。EAMの動作にはバイアス電圧が必要だが、このバイアス電圧が前述の終端回路にも印可され、電流が流れる。このことによる電力消費がチップ全体の電力消費量の19%を占めるため、対応を検討した。

解決策は、終端回路に直列で接続されるキャパシターを追加することであった。これにより高周波回路(RF Circuit)からの信号はEAMと終端回路の双方に流れるが、直流のバイアス電流のみ終端回路に流れなくなる。この仕組みにより、終端回路におけるバイアス電流の電力消費

を削減した。

この対策を施したHi-FIT AXELを使い、4-PAMによる214Gbps伝送実験を行った際のモジュールの写真を図5に、出力波形を重ね合わせたEye波形を図6に示す。波形から出力が4つのレベルにきれいに分かれていることが確認できる。

光通信デバイスの小型化・低消費電力化に大きなインパクト

本研究の今後について、金澤氏は次のように述べている。

「1チャンネルあたり100Gbpsの上限が200Gbpsになれば、同じ通信速度を実現するのに要するチャンネル数が半分になるため、チップの占有面積は半分で済みます。消費電力は単純に半分になるわけではないものの、低消費電力化にも大きなインパクトのある技術と考えています。2024～2025年頃にはHi-FIT AXELモジュールを適用した光トランシーバーを実用化できるよう、さらなる研究開発に取り組んでいます。将来的には10km超級のメトロ・アクセス系NWに適用できるレベルまで光出力を高めることが可能と考えています。」

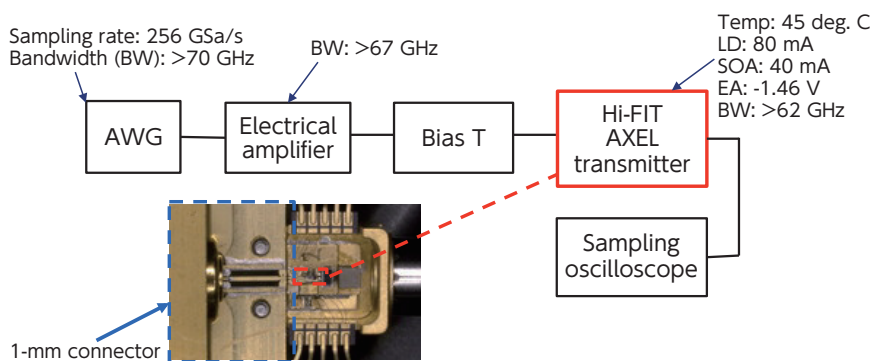


図5 Eye波形を測定した際の回路とモジュールの写真