



40Gbit/s光通信用増幅器IC

小杉 真

世界のインターネット利用人口は全世界人口の1割を占める6億人を突破し、右肩上がりに増加している。インターネット上のサービスも以前のテキスト配信から電子商取引、オンラインゲームをはじめとするマルチメディア配信などへと変化し、データ通信量が爆発的に増大している。これに伴い、光通信システムの通信容量の更なる拡大が求められている。通信容量を増大させる方法の1つとして、通信速度の高速化が挙げられる。

通信速度は、電子・光デバイスの高速化に対応して、現在では10Gbit/s光通信システムが実用化されている。更なる高速化のために、40Gbit/s光通信システムの開発が世界中で活発に進められている。

40Gbit/sの通信速度を実現するため、増幅器をはじめ、超高速動作が可能な各種の回路が作られている¹⁾。中でも増幅器ICは光通信システムの送信部、受信部両方に使われる重要な回路である。以下、当社が開発した40Gbit/s光通信用増幅器ICについて述べ、更に、現在評価中の80Gbit/s対応増幅器ICについてご紹介する。

40Gbit/s光通信用増幅器ICの概要

40Gbit/sの通信速度を実現するためには、トランジスタの性能を上げる方法と回路構成を工夫する方法とがある。当社は、EA (Electroabsorption, 電界吸収型) 変調器ドライバ²⁾ やTIA (Transimpedance Amplifier, トランスインピーダンス増幅器)³⁾ をはじめとする10Gbit/s光通信用ICで実績のある0.1 μ mゲートGaAs p-HEMT (pseudomorphic High Electron Mobility Transistor, 高電子移動度トランジスタ)⁴⁾ プロセスを所有している。本報告では、既存の該トランジスタを使用しトランジスタの性能を上げるのではなく、回路構成に分布型を採用することにより、40Gbit/s光通信用増幅器ICを実現した。

分布型増幅器は、広帯域特性を得る手段として真空管の時代に考案された回路構成である。図1に分布型増幅器の回路構成を示す。図中の四角は伝送線路を表している。分布型増幅器では信号が並列に接続された複数のFET

(Field Effect Transistor, 電界効果トランジスタ) に進行波的に入力され、増幅された信号が同位相で合成される。FETの容量と伝送線路のインダクタンス成分が擬似的な分布定数線路を形成するため、広帯域特性を実現できる。

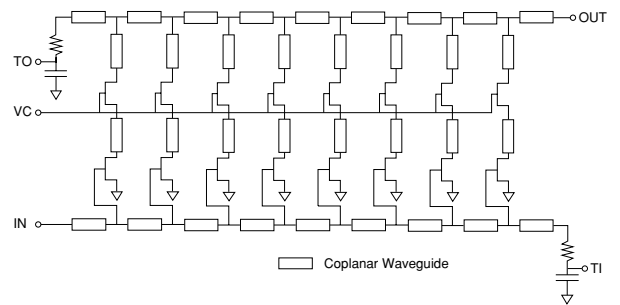


図1 分布型増幅器の回路構成

モデリング

分布型増幅器設計には、FETおよび伝送線路のモデルが非常に重要である。そこで、FETは回路内で使用する形状および大きさが同じものを使用してモデリングした。また、伝送線路に関しては市販ベースのシミュレーション

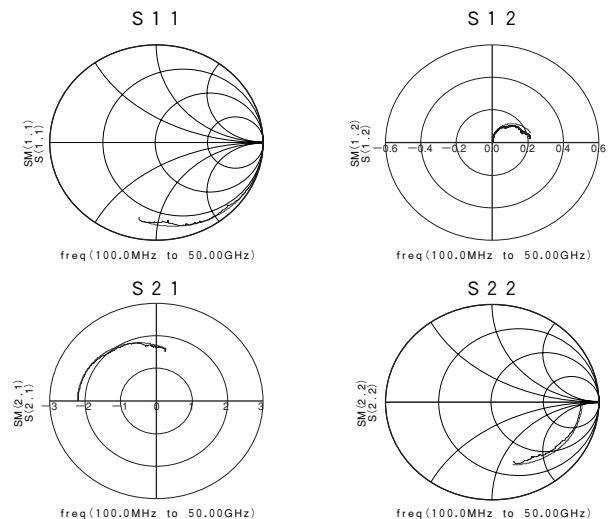


図2 FETのSパラメータ:シミュレーション結果と実測結果の比較

ンモデルライブラリを用いず、専用パターンから独自のモデルを作成した。

FETのモデリングは、100MHzから50GHzの範囲でパラメータをフィッティングした。パラメータフィッティング後のシミュレーション結果と実測結果の比較を図2に示す。細線がシミュレーション結果を示し、太線が実測結果を示す。バイアス条件はドレイン電圧 (V_{ds}) が2.0V、ゲート電圧 (V_{gs}) が-0.2Vである。4種類のSパラメータ (S11, S21, S12, S22) 全てにおいて、シミュレーション結果と実測結果とがほぼ重なっており、非常に実測値に近いFETモデルが得られた。

伝送線路のモデリングは、専用のテストパターンを用いて、特性インピーダンス、減衰係数、位相係数を求め、下式を用いてシミュレーションモデルを作成した。

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma L} \\ e^{-\gamma L} & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} Z1: \text{入力インピーダンス} \\ Z2: \text{出力インピーダンス} \end{array}$$

L : 伝送線路の長さ
 γ : $\alpha + i\beta$
 α : 減衰定数
 β : 位相定数

異なる長さや幅の伝送線路を作製し、モデルを使用したシミュレーション結果と実測結果とを比較してモデルの精度を検証した。FET同様、非常に精度の良い伝送線路モデルが得られた。

回路設計

まずDC解析により、利得と動作点を考慮してFETのトータルゲート幅を決定した。次に小信号解析により、帯域と反射特性を考慮して個々のFETのゲート幅やトータルのFETの数(段数)、伝送線路の長さや太さを決定した。

分布型増幅器は、FETのトータルゲート幅を大きくすることにより、利得を上げることができる。また、個々のFETのゲート幅を小さくすることにより、容量成分が小さくなり、帯域を広げることができる。従って理論的には、個々のFETのゲート幅をできる限り小さくして、FETの段数を増やしてトータルゲート幅を大きくすれば、広帯域・高利得を実現できる。しかしながら実際の回路においては、FETの段数を増やすと伝送線路の損失のため周波数に対して右肩下がりの利得特性になる。この問題点の解決方法として、回路に工夫を加えることで伝送線路の損失を補償した例も報告されているが、本増幅器ICは、伝送線路のインピーダンスと長さの最適化で、利得を平坦化した。

40Gbit/s光通信増幅器ICの特性

40Gbit/s光通信増幅器ICの外観写真を写真1に示す。チップの左右に入出力ポート、下側にバイアスポート、上下に終端ポートを配置した。チップサイズは2.68mm×1.40mmである。チップの厚みは0.4mmである。

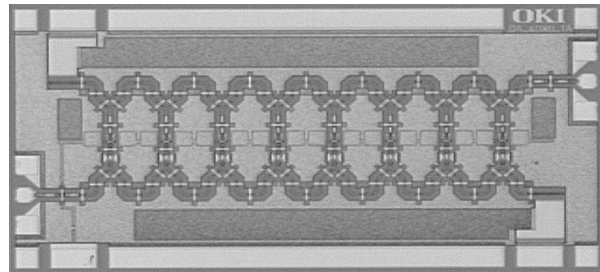


写真1 40Gbit/s光通信増幅器ICの外観写真

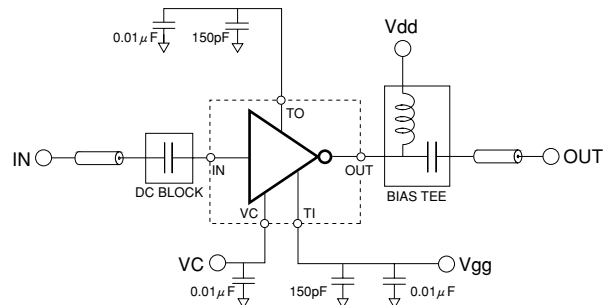


図3 測定評価系概念図

本ICの測定評価系概念図を図3に示す。図3の点線で囲った部分が40Gbit/s光通信増幅器IC(写真1)である。入力ポート(IN)にDCブロックを接続し、出力ポート(OUT)にバイアスティを接続する。Vdd端子より、回路の電源電圧を増幅器ICに供給する。バイアスポート(VC)には、電源安定用の容量を接続する。終端ポート(TO, TI)には、回路を低周波まで動作させるための容量を接続する。Vgg, VC端子より、FETのゲート電圧を供給する。小信号Sパラメータ特性を図4に示す。横軸が周波数、

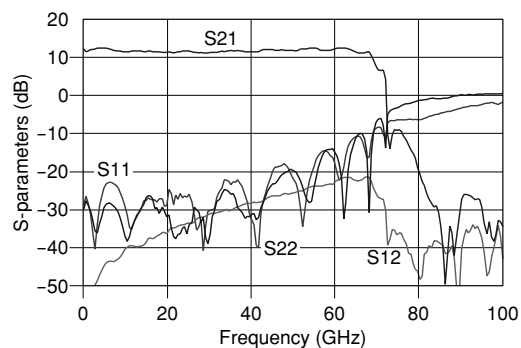


図4 小信号Sパラメータ特性

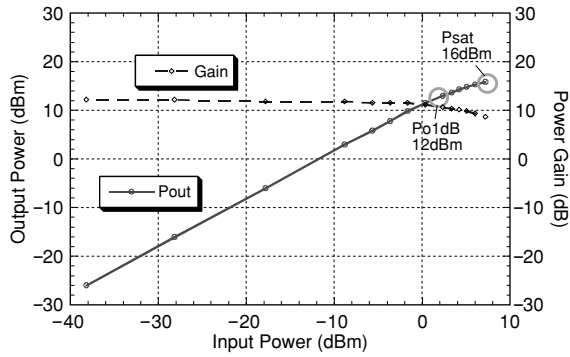


図5 入出力パワー特性

縦軸がSパラメータ特性である。バイアス条件は、電源電圧 V_{dd} が3.3V、ゲート電圧 V_C が1.2V、ゲート電圧 V_{gg} を調整して回路電流 I_{dd} が64mAである。

利得は、40GHzで11.5dBと高利得が得られた。利得平坦度は、60GHz以下の領域において ± 0.6 dBであり、非常に平坦な周波数特性が得られた。3dB帯域は、69GHzと超広帯域特性が得られた。入出力反射特性は、40GHz以下の領域において -22 dB (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR=1.17) 以下と極めて良好な特性が得られた。

入出力パワー特性を図5に示す。横軸が入力パワー、縦軸が出力パワーと利得である。周波数は40GHzである。1dB利得圧縮パワーは12dBmである。入力パワーが7dBmの時の出力パワーは16dBmと高出力パワーが得られた。

40Gbit/s擬似ランダム信号を用いた増幅器ICの出力波形を図6に示す。入力信号はPPG (Pulse Pattern Generator) により40Gbit/sの31段擬似ランダム信号 (PRBS) を発生させて、ベッセルフィルタを通して回路に入力した。入力振幅1.0Vのときの出力振幅は2.8Vであり、大振幅が必要とされるEA変調器ドライバとしても十分な出力振幅が得られた。

オンウェハでの測定のため、高周波プローブや入出力に長いケーブルが必要である。そのため測定条件としては決して良くないので、測定系による波形劣化を調べる

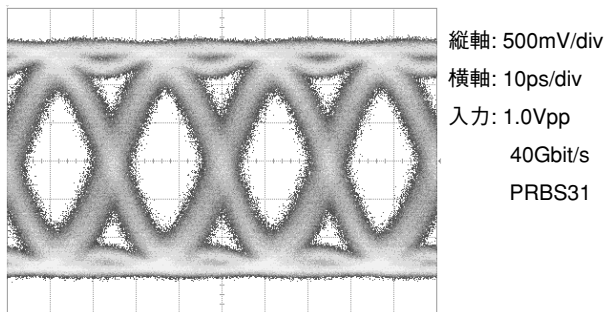


図6 増幅器ICの40Gbit/sの出力波形

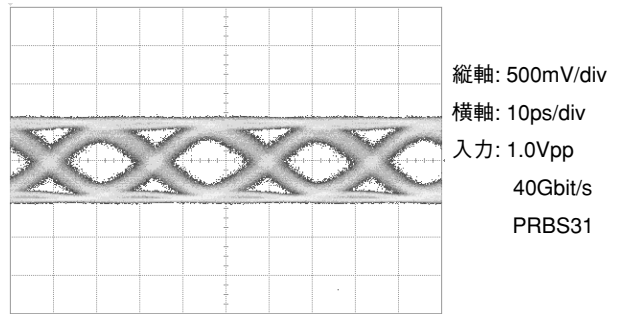


図7 伝送線路基板の40Gbit/sの出力波形

ために、増幅器ICを伝送線路基板に置き換えたときの出力波形を測定した (図7)。

伝送線路基板の出力波形も増幅器ICの出力波形同様かなり波形劣化がある。したがって、出力波形の劣化は主に測定系に起因するものであることがわかった。このような測定条件下にもかかわらず、比較的良好的なアイパターンが観測された。

雑音指数特性を図8に示す。横軸が周波数、縦軸が雑音指数である。測定周波数範囲は26GHzから40GHzである。

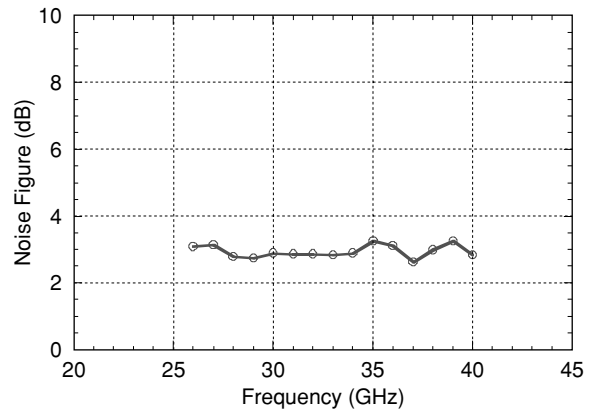


図8 雑音指数特性

雑音指数は3.5dB以下と好結果を得た。これまで報告されたGaAs p-HEMT系の分布型増幅器ICとしてはトップクラスの性能である。送信用の増幅器のみならず、受信用の低雑音増幅器としても適応可能である。

利得の温度特性を図9に示す。横軸が周波数、縦軸が利得である。

測定温度は -25°C から 100°C まで 25°C 刻みである。温度の上昇に伴い、利得は減少する。周波数が高くなるにつれて利得の変化量は若干大きくなるものの、利得の周波数依存性に大きな変化はない。最も利得の温度変化が大きな60GHzにおいても、利得の温度変化量は $0.02\text{dB}/^{\circ}\text{C}$ と非常に良好である。

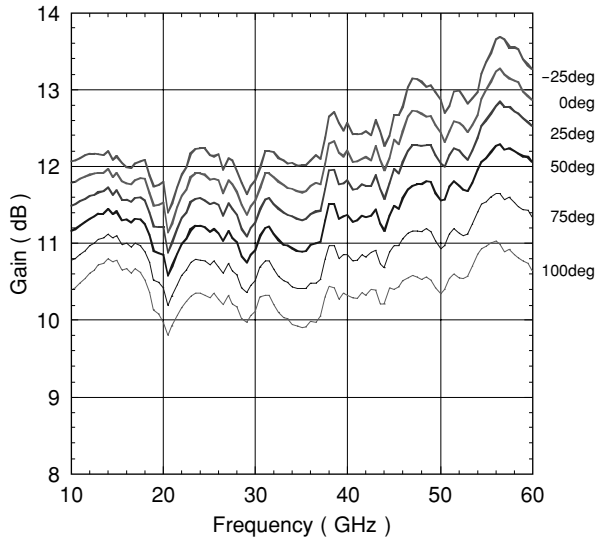


図9 温度特性

まとめ

40Gbit/s光通信システムへの適用を目的として、広帯域分布型増幅器ICを開発した。

開発した増幅器ICは、11.5dBの高利得と69GHzの広帯域特性を実現した。出力パワーも16dBm以上と高出力パワーが得られた。40Gbit/sの出力振幅として2.8Vが得られ、EA変調器ドライバIC等への適用が可能である。また、雑音指数も3.5dB以下と低雑音であり、ドライバICのみならず低雑音増幅器ICとしても適応可能である。利得の温度変化量も0.02dB/°Cと良好であった。

あとがき

ここで示した広帯域分布型増幅器の手法を用いて、更なる高速化に対応することも可能である。例として、現在評価中の更に広帯域にした増幅器ICのSパラメータ特性を図10に示す。

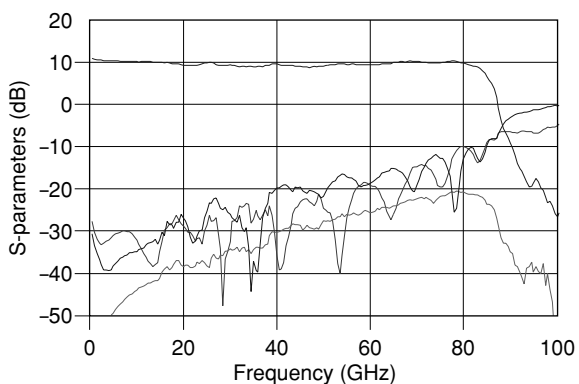


図10 広帯域版のSパラメータ特性

利得10dB、帯域85GHzと更に広帯域な特性が得られ、80Gbit/sにも対応可能である。

更なる増幅器ICの性能向上を目指して、通信速度の高速化に大きく寄与できることを願っている。◆◆

参考文献

- 1) 小杉他：GaAs 40Gb/s光通信用分布増幅器IC，電子デバイス研究会，EDD-02-52，p.37，2002年
- 2) A.Nishino *et al.*:A low power electroabsorption modulator driver IC for 10 Gbps optical transmitter, OFC Technical Digest WM58-1, p.365, 1999
- 3) H.Ikeda *et al.*:An auto-gain control transimpedance amplifier with low noise and wide input dynamic range for 10-Gb/s optical communication systems, IEEE J. Solid-State Circuits, VOL.36, NO.9, p.1303, 2001
- 4) T.Ohshima *et al.*: Gate orientation dependence of InGaAs/AlGaAs high electron mobility transistors formed by wet recess etching, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.39, p.5052, 2000

筆者紹介

小杉真：Makoto Kosugi.オプティカルコンポーネントカンパニー III-Vデバイス部 光通信受信IC設計チーム