

GaN広帯域高出力MMIC増幅器

山中宏治* 小山英寿***
 桑田英悟**
 加茂宣卓***

GaN Broadband High Power MMIC Amplifier

Koji Yamanaka, Eigo Kuwata, Yoshitaka Kamo, Hidetoshi Koyama

要旨

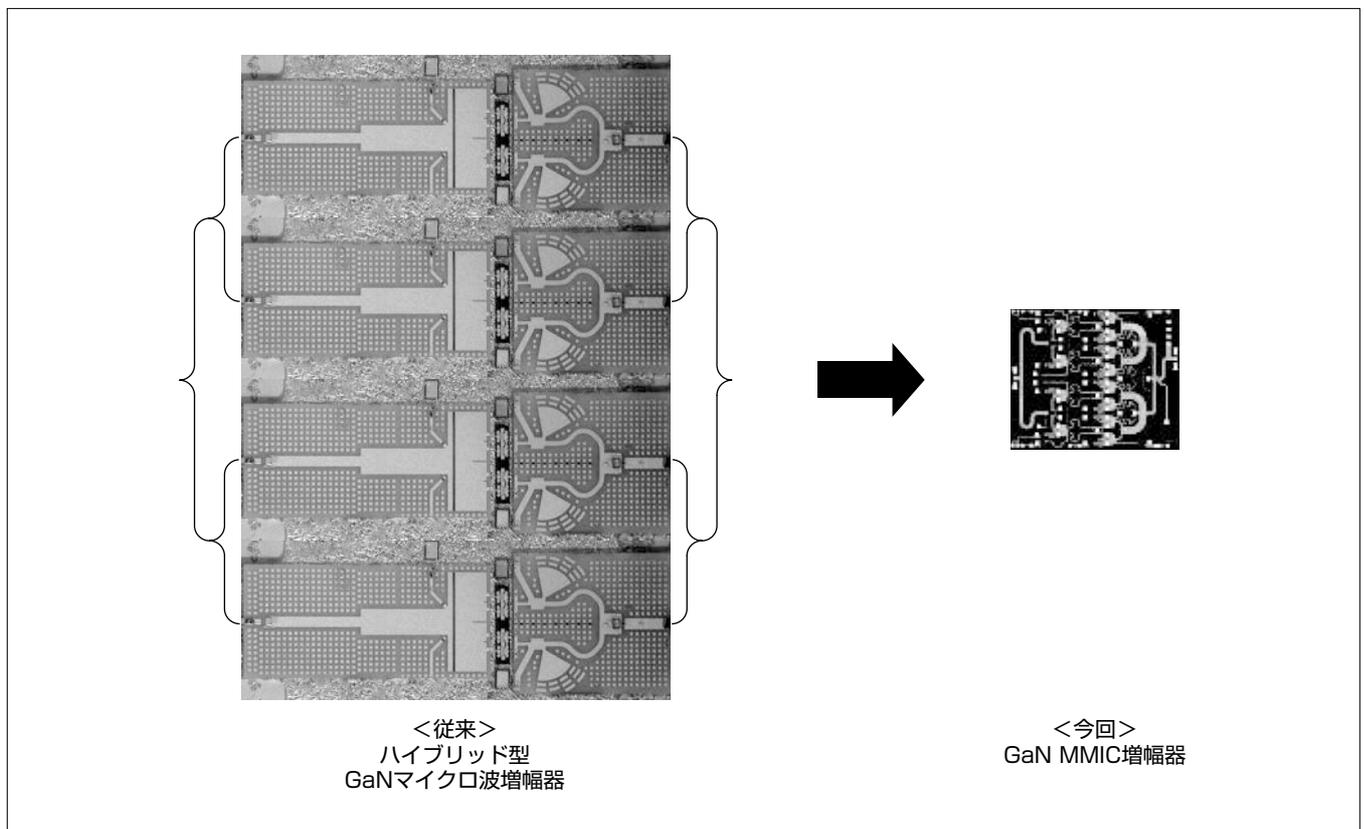
近年、GaN(Gallium Nitride：窒化ガリウム)トランジスタを用いたマイクロ波帯高出力増幅器の研究開発が盛んに行われている。GaNは従来マイクロ波帯で使用されてきたGaAs(Gallium Arsenide：ガリウム砒素(ひそ))に比べて約10倍の高電圧動作が可能であり、出力電力も約10倍の高出力が期待できる。三菱電機でもGaNトランジスタを用いたマイクロ波帯増幅器の研究開発を行ってきたがこれまではすべてトランジスタとインピーダンス整合回路を別材料で形成したハイブリッド型回路構成であった。

ハイブリッド型回路構成ではインピーダンス整合回路は分布定数線路を用いて構成されるために回路サイズを小さくすることは難しい。これに対してMMIC型の回路構成の場合にはMIM(Metal Insulator Metal)キャパシタやスパイラルインダクタを使用した集中定数型の小型回路設計が

可能である。そこでGaNトランジスタを用いた広帯域高出力MMIC増幅器の試作・評価を行った。その結果、6～18GHzの広帯域で14～24W(平均20W)と従来のGaAs MMIC増幅器に比べて約10倍の高出力を得ることができた。これはC～Ku帯広帯域GaN MMIC増幅器としては世界最高出力^(注1)である。また従来のハイブリッド型GaN広帯域高出力増幅器と比較しても約4倍の出力電力である。同じ出力電力で考えるとMMIC化したことによってハイブリッド型回路構成に比べて回路サイズを1/12に小型化することができた。

本稿ではトランジスタとインピーダンス整合回路を一体成形したGaN MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)広帯域高出力増幅器の試作結果について述べる。

(注1) 2011年3月31日現在、当社調べ



<従来>
 ハイブリッド型
 GaNマイクロ波増幅器

<今回>
 GaN MMIC増幅器

MMIC化による広帯域高出力増幅器の小型化

従来のハイブリッド型回路構成によるGaN広帯域高出力増幅器は20W出力を得るのに総回路サイズが230mm²と大きい問題があった。今回MMIC技術を用いた小型化開発によって総回路サイズは19mm²と、従来のハイブリッド型回路構成に比べて約1/12に小型化することができた。

1. ま え が き

マイクロ波帯(3~30GHz)の半導体増幅器には、従来GaAsという半導体材料が使用されてきた。近年、高電圧で動作することができ大きな出力電力が期待できるGaNトランジスタを用いたマイクロ波増幅器の研究開発が盛んに行われている。当社でも60W出力C帯^(注2)広帯域高出力GaN増幅器⁽¹⁾をはじめとしてX帯^(注3)高出力GaN増幅器やC~Ku帯^(注4)広帯域高出力GaN増幅器⁽²⁾等を開発してきた⁽²⁾。これまでの当社のGaN増幅器はすべてGaNトランジスタとインピーダンス整合回路が別材料で構成されたいわゆるハイブリッド型回路構成であったが、回路の小型化を考えるならばトランジスタとインピーダンス整合回路を一体化したモノリシック集積回路型(MMIC)の方が有利である。

本稿ではGaNトランジスタを用いた広帯域高出力MMIC増幅器の試作結果について述べる。GaNトランジスタを使用することで従来のGaAsトランジスタに比べて約10倍の出力が得られた。また従来ハイブリッド型回路構成と比べて回路サイズを約1/12に小型化できた。ここで得られている平均20Wの出力電力はC~Ku帯広帯域高出力GaN増幅器としては世界最高の出力電力である。

(注2) C帯：4~8GHzの周波数の総称
 (注3) X帯：8~12.4GHzの周波数の総称
 (注4) Ku帯：12.4~18GHzの周波数の総称

2. GaNトランジスタ

表1に従来のマイクロ波増幅器に使用されてきたGaAsとGaNの材料物性の比較を示す。GaNはGaAsと同じ閃亜鉛型結晶構造を持った半導体材料であり砒素原子(As)が窒素原子(N)に置換された構造をしている。窒素原子は砒素原子に比べて原子半径が小さいため結晶格子が小さい。一般に価電子帯と伝導体のエネルギー差(バンドギャップ)は結晶格子の小さな材料ほど大きくなる。GaNのバンドギャップはGaAsに比べて2.4倍大きい。このためGaNは炭化珪素(Silicon Carbide: SiC)などと並んでワイドバンドギャップ材料と称されている。

バンドギャップが大きいという性質によって、GaNは絶縁破壊電界が高いという利点を持つ。つまりGaNはGaAsに比べてより大きな電圧を印加することができる。実際、

表1. GaAsとGaNの材料物性比較

	ガリウム砒素	窒化ガリウム
元素記号	GaAs	GaN
格子定数(Å)	5.653	3.189
バンドギャップ(eV)	1.43	3.40
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.4~0.6	2.0~2.8
動作電圧(V)	5~10	30~50
出力電力密度(W/mm)	0.3~0.5	3.0~5.0
基板の熱伝導率(W/cmK)	0.5	49

GaAsトランジスタの典型的な動作ドレインバイアスは5~10Vであるのに対してGaNトランジスタの動作ドレインバイアスは30~50Vと約5倍の電圧で動作させることができる。結果として単位ゲート幅あたりの出力電力(出力電力密度)はGaAsトランジスタでは0.3~0.5W/mmであるが、GaNトランジスタでは3.0~5.0W/mmとGaAsトランジスタに比べ約10倍大きい。このため従来のGaAsマイクロ波増幅器に比べて劇的な高出力化、小型化を期待できる。またGaNトランジスタはSiC基板上に形成されるが、SiC基板はGaAs基板に比べて熱伝導率が約10倍大きい。このため熱設計の観点からもGaNトランジスタはGaAsトランジスタよりも有望である。

3. MMIC技術による小型化

マイクロ波増幅器の構成方法には大きくハイブリッド型回路構成とMMIC型回路構成の2種類がある。図1にハイブリッド型回路構成とMMIC型回路構成によるC~Ku帯広帯域増幅器の一例をそれぞれ示す。

ハイブリッド型回路構成はトランジスタ部分のみを半導体材料で作成し、インピーダンス整合回路はアルミナ基板などの絶縁体基板材料上に金属膜パターンを形成して構成する。ハイブリッド型回路構成では1/4波長インピーダンス変成回路などの分布定数型のインピーダンス変成回路が用いられるためインピーダンス整合回路は大きくなる。例えばアルミナ基板上におけるマイクロ波伝送線の6GHzにおける1/4波長に対応する長さはおおよそ2.5mmであるから入力側と出力側のインピーダンス整合回路をそれぞれ一つのインピーダンス変成回路のみで構成したとしても回路サイズを5mm以下にすることは難しい。特に広帯域増幅器では2つ以上のインピーダンス変成回路を縦続接続して動作周波数帯域を広帯域化する工夫がなされるため回路サイズは更に大きくなる。トランジスタとインピーダンス整合回路は金属ワイヤで接続されるが、トランジスタとインピーダンス整合回路の位置合わせがずれるとこの金属ワイヤの長さが変化し、金属ワイヤによるインダクタンスも変化する。このためハイブリッド型回路構成は電気特性のばらつきを生じやすい。

これに対してMMIC型回路構成はトランジスタとインピーダンス整合回路は同じ半導体基板上に一体で形成されている。一般に半導体基板の方が絶縁体基板よりも高価であるから、MMIC型回路構成では回路サイズを小さくする回路設計技術が重要となる。このため薄い誘電体材料を金属電極で挟み込む構造をしたMIMキャパシタや細い伝送線を渦巻状に形成して面積あたりのインダクタンス値を大きくする工夫をしたスパイラルインダクタなどを用いた集中定数型の回路設計が多用される。例えばアルミナ基板(基板厚200μm)上で特性インピーダンス20Ω、6GHzで

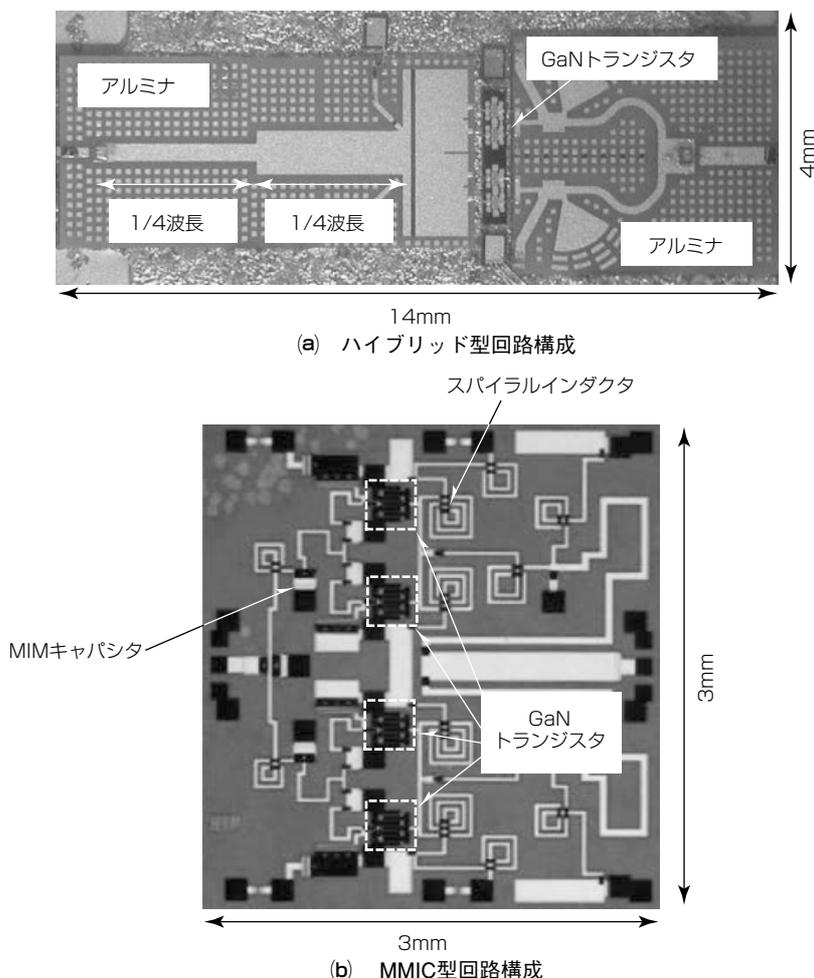


図1. 広帯域マイクロ波増幅器の回路構成比較

1/4波長となる伝送線路は幅0.4mm、長さ2.5mmの大きさとなるが、これと同じ機能をMIMキャパシタとスパイラルインダクタで実現した場合、その回路サイズは0.4×0.4 (mm)程度に小型化することができる。またMMICではトランジスタとインピーダンス整合回路は一体成形されているため電気特性のばらつきを生じにくい。

図1に示したハイブリッド型回路構成とMMIC型回路構成の増幅器は同じ目標出力電力(5W)に対して回路設計されたものであり、使用されているGaNトランジスタのゲート幅も同一である。ただしMMIC型の回路構成を見やすくするために両者の縮尺は異なっている。ハイブリッド型回路構成では回路サイズは14×4 (mm)であるが、MMIC型回路構成では3×3 (mm)に小型化することができている。

4. GaN広帯域高出力MMIC増幅器

近年、C~Ku帯GaN広帯域高出力MMIC増幅器の研究開発が盛んに行われており⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、すでに10W以上の出力電力が報告されている。しかしながら市販のGaAs広帯域MMIC増幅器で3Wの出力電力が得られていることを鑑(かんが)みるならば、GaNトランジスタを用いれば15W~20W程度の出力電力が期待されるところである。そこで当

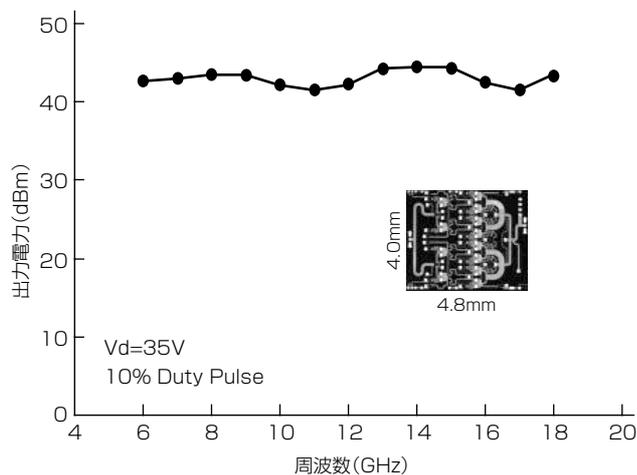


図2. C~Ku帯広帯域GaN MMIC増幅器の試作結果

社では平均で20Wの出力電力を持つC~Ku帯GaN広帯域高出力MMIC増幅器の試作を行った。図2に試作したC~Ku帯GaN広帯域高出力MMIC増幅器の出力電力の周波数特性測定結果を示す。内挿図は試作したGaN MMICのチップ写真であり、チップサイズは4.8×4.0 (mm)である。測定ではドレイン電圧を35Vとし、パルスデューティ10%のパルス動作で測定を行った。測定の結果、6~18GHzで出力

表 2. C~Ku帯GaN MMIC増幅器の比較

	出力電力	チップ面積
参考文献(3)	12~14W	19mm ²
参考文献(4)	11~18W	—
参考文献(5)	6~10W	20mm ²
今回	14~24W	19mm ²

表 3. GaAs MMIC及びハイブリッド型増幅器との比較

	出力電力	回路サイズ
GaAs MMIC増幅器 ⁽⁶⁾	2 W	25mm ²
GaNハイブリッド増幅器 ⁽²⁾	5 W	56mm ²
GaN MMIC増幅器(今回)	20W	19mm ²

電力14~24W(平均20W)を得ることができた。広帯域増幅器では動作周波数の上限周波数(FH)と下限周波数(FL)の比(FH/FL)が広帯域性能の目安として使用される。図2ではFH/FL=3であるから、この増幅器は“3倍帯域増幅器”となる。

表2には、文献で報告されているC~Ku帯3倍帯域GaN MMIC増幅器の電気性能を今回の結果と比較して示す。今回はC~Ku帯で3倍帯域以上の動作比帯域を持つGaN MMIC増幅器のなかで世界最高の出力電力を達成している。

表3には、今回の結果を当社で開発したGaAs MMIC増幅器及びハイブリッド型GaN増幅器と比較した結果を示す。GaAs MMICに比べて今回は約10倍の出力電力を持つ。又ハイブリッド型GaN増幅器と比較した場合、出力電力は約4倍に、回路サイズは約1/3に小型化されている。換言すればハイブリッド型回路構成からMMIC型回路構成にしたことで同じ出力を得るために必要な回路サイズを約1/12に小型化することができた。

5. む す び

GaNトランジスタを用いた広帯域高出力MMIC増幅器の試作結果について述べた。C~Ku帯3倍帯域で世界最高出力である平均20Wの出力電力を得ることができた。これは従来のGaAs MMIC増幅器の約10倍の出力電力であり、MMIC技術を適用したことでハイブリッド型回路構成と比較して回路サイズを1/12に小型化できた。

参 考 文 献

- (1) 山本佳嗣, ほか: Cat-DVD法により保護膜形成したC帯100W超級GaN-HEMT, 三菱電機技報, **80**, No.5, 333~336 (2006)
- (2) 中山正敏, ほか: GaNマイクロ波帯増幅器技術, 三菱電機技報, **84**, No.11, 609~612 (2010)
- (3) Masuda, S., et al.: Over 10W C-Ku Band GaN MMIC Non-uniform Distributed Power Amplifier with Broadband Couplers, 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1388~1391 (2010)
- (4) Reese, E., et al.: Wideband Power Amplifier MMICs Utilizing GaN on SiC, 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1230~1233 (2010)
- (5) Mouginot, G., et al.: Three Stage 6-18 GHz High Gain and High Power Amplifier based on GaN Technology, 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1392~1395 (2010)
- (6) 小倉健太郎, ほか: ドレーンドライブ型送受切り替え方式の受信時損失低減の検討, 電子情報通信学会総合大会, C-2-30 (2003)