

# BCB薄膜誘電体層を持つ60 GHz帯MMIC増幅器

60 GHz-Band Monolithic HEMT Amplifiers Using BCB Thin-Film Layers

小野 直子  
ONO Naoko

天野 実  
AMANO Minoru

昆野 舜夫  
KONNO Mitsuo

民生用ミリ波MMIC (Monolithic Microwave IC) が注目を集め始めており、高性能、小型、低価格MMICの開発が活発に行われている。これは、60 GHz帯無線LAN、76 GHz帯車載レーダなどへの適用が期待される。

当社は、GaAs基板上の絶縁体層としてBCB(Benzo-Cyclo-Butene)薄膜誘電体層を持つ60 GHz帯HEMT MMIC増幅器を開発した。このMMICは、BCB薄膜誘電体層の採用によりレイアウトの自由度が大きく、小型の薄膜マイクロストリップ線路と、損失の少ないコプレーナ線路の両方を使用可能にした。開発した新規構造MMICは、従来よりサイズを22.5%小型にでき、周波数帯域幅を11倍にできた。新規構造MMIC増幅器は、サイズ1.1 mm×1.55 mm、59.5 GHzでの利得が15.8 dBである。

Millimeter-wave monolithic microwave integrated circuits (MMICs) for commercial use have attracted much attention in applications such as 60 GHz wireless LANs and 76 GHz automotive radar.

We have developed 60 GHz-band monolithic high-electron mobility transistor (HEMT) amplifiers adopting benzo-cyclo-butene (BCB) thin-film layers on GaAs substrates. The adoption of the BCB thin-film layers enabled the MMIC to incorporate both a thin-film microstrip line with the advantages of great flexibility in layout and small size, and a coplanar waveguide with the advantage of low loss.

The newly developed MMIC is 22.5% smaller and the frequency bandwidth 11 times wider than a conventional MMIC. A gain of 15.8 dB at 59.5 GHz was obtained.

## 1 まえがき

民生用ミリ波MMICが注目を集めている。60 GHz帯無線LAN、76 GHz帯車載レーダなどへのMMICの適用が期待される。MMICには、高性能、小型、低価格であることが望まれるが、これらを実現するためには、能動素子に加えて受動素子の果たす役割も大きくなる。

マイクロストリップ線路<sup>(注1)</sup>とコプレーナ線路<sup>(注2)</sup>は、従来からMMICに使われてきた典型的な伝送線路である。しかし、マイクロストリップ線路は、ガリウムヒ素(GaAs)基板を誘電体として用いるため、GaAs基板の研磨加工やバイアホール<sup>(注3)</sup>加工が必要であるなどの制約があった。また、コプレーナ線路は、レイアウト面積が大きい、レイアウト設計の自由度が小さいという制約があった。

近年、従来の制約を超える新しい線路として、薄膜マイクロストリップ線路が提案された<sup>(1)</sup>。薄膜マイクロストリップ線路は、樹脂薄膜を誘電体として用いるため、GaAs基板の研

磨加工やバイアホール加工が不要である安価な構造である。更に、従来の線路よりレイアウト面積を小さくでき、レイアウト設計の自由度を大きくできる。ただし、微細化によって配線抵抗が増大するという問題がある。

当社は、コプレーナ線路と薄膜マイクロストリップ線路を複合化した配線構造をミリ波MMIC用の新規配線構造として提案する。また、この構造を用いて、60 GHz帯HEMT (High Electron Mobility Transistor) MMIC増幅器を開発した<sup>(2)</sup>。薄膜マイクロストリップ線路の誘電体としては、BCB薄膜を使用した。ここでは、新規構造のMMIC、及びMMICの構成要素である伝送線路とHEMTの特性を、従来構造のMMICのものと比較しながら述べ、開発した新規構造のMMICの有用性を明らかにする。

## 2 MMICの構造

GaAs基板上に絶縁層としてBCB薄膜誘電体層を持つ60 GHz帯HEMT MMIC増幅器を開発した。BCBは、これまで絶縁材料として一般的に使われてきたポリイミドやエポキシと比べて、優れた電気特性と熱特性を持つ材料であり、高周波システムへの適用が期待されている<sup>(3), (4)</sup>。

二つの異なる構造を持つ60 GHz帯GaAs HEMT MMIC増幅器を試作し、それらの性能と大きさを比較した。MMIC

(注1) 誘電体基板と、誘電体基板の主面に形成された幅の狭い導体と、裏面に形成された幅の広い導体により構成される伝送線路。高周波平面回路用線路として広く用いられている。

(注2) 誘電体基板上に、幅の細い中心導体とその両側に幅の狭い間隔を隔てて位置する幅の広い二つの導体の、合計3導体で形成される高周波平面回路用伝送線路。

(注3) 誘電体基板の上面と下面の導体パターンを電気的に接続することを目的として設けられた、内壁に導体を持つ基板の穴のこと。

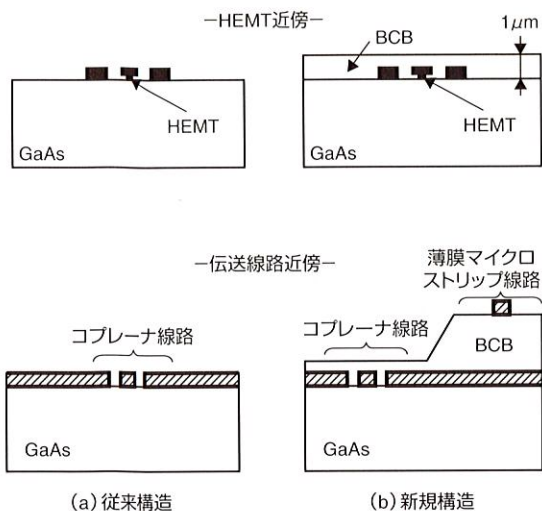


図1. MMICの断面構造 新規構造のMMICは、薄膜マイクロストリップ線路とコプレーナ線路の両方を使用できる。  
Cross-sectional views of MMIC structures

のHEMT近傍及び伝送線路近傍の断面構造を図1に示す。一つは図1(a)に示すように、GaAs基板上にBCB薄膜誘電体層がない従来構造MMICで、その伝送線路としてコプレーナ線路を用いる。もう一つは図1(b)に示すように、GaAs基板上に選択的に厚みを変えられたBCB薄膜誘電体層を持つ新規構造MMICで、その伝送線路として薄膜マイクロストリップ線路とコプレーナ線路の両方が使用可能である。

### 3 部品の特性

実際にMMIC増幅器を試作する前に、未確認事項である伝送線路と、MMICの構造に依存するHEMTの電気特性を、従来構造と比べながら調べ、長所と短所を明らかにした。

#### 3.1 伝送線路の特性

新規線路である薄膜マイクロストリップ線路と、従来の線路であるコプレーナ線路の基本的な高周波特性を、TEG (Test Element Group)を測ることにより求めた。線路TEGの寸法は、特性インピーダンスが50Ωになるように決めた。実測に基づく伝送線路の特性を表1に示す。実効比誘電率に関しては、コプレーナ線路の方が高いことがわかる。また、一波長当たりの損失に関しては、薄膜マイクロストリップ線路の方がやや大きいことがわかる。したがって、回路の損失の点では、コプレーナ線路の方が優れている。

レイアウト設計について考える。コプレーナ線路は、信号線の両側に幅の広いグラウンド用メタルパターンが必要なため、大面積を必要とし、レイアウト設計の自由度が小さい。一方、薄膜マイクロストリップ線路は、信号線用メタルパターンとグラウンド用メタルパターンとが異なる層にあるため、レイアウト設計の自由度が大きく、小面積で配線できる。したが

表1. 実測に基づく伝送線路の特性  
Measured characteristics of transmission lines

項目	周波数=60GHz	
	コプレーナ線路	薄膜マイクロストリップ線路
実効比誘電率	6.93	2.22
損失 (dB/λ)	0.91	1.17
波長 (mm)	1.91	3.31

って、レイアウト設計の点では、薄膜マイクロストリップ線路の方が優れている。レイアウト設計の実例は4.2節に述べる。

#### 3.2 HEMTの特性

従来構造のMMICと新規構造のMMICにおけるGaAs HEMTの高周波特性を求め、比較した。BCB誘電体層の厚みに対するHEMTの特性を図2に示す。ゲート長0.1μm、ゲート幅100μmのHEMTを用いた。

特性インピーダンス50Ω、信号線路幅26μmの薄膜マイクロストリップ線路を作るには、約10μm厚のBCB薄膜誘電体層が必要である。しかし、新規構造の場合、BCB薄膜誘電体層があるために、HEMTのゲート、ドレイン間容量(以下、 $C_{gd}$ と略記)が従来構造より大きくなる。更に、BCB薄膜誘電体層はHEMTのMSG (Maximum Stable Gain)を減少させる。従来構造を持つHEMTの $C_{gd}$ を基準にすると、1μm厚のBCB薄膜誘電体層を持つHEMTの $C_{gd}$ の比率は160%、9.6μm厚のBCB薄膜誘電体層を持つHEMTの $C_{gd}$ の比率は183%である。

それゆえに、新規構造MMICにおいて、 $C_{gd}$ を減らすために、HEMT上のBCBの厚みをGaAs基板上のHEMT以外の領域に比べ薄くした。HEMT上のBCB薄膜誘電体層の厚みは1μmである。HEMT上に1μm厚のBCB薄膜誘電体層を残した理由は、保護膜として用いるため、及びプロセスの制約により必要であるためである。

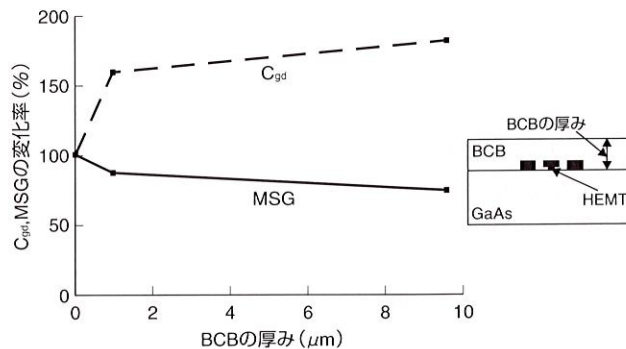


図2. BCB誘電体層の厚みに対するHEMTの特性 HEMT上にBCB層がある場合には、ない場合に比べ $C_{gd}$ が増加、MSGが減少する。  
Dependence of HEMT characteristics on BCB film layer thickness

表2. HEMT特性のMMIC構造依存性

Characteristics of HEMTs according to MMIC structure

項目	従来構造MMICのHEMT	新規構造MMICのHEMT
Ft (GHz)	90	75
MSG at 60GHz (dB)	8.4	7.4
C <sub>gd</sub> (fF)	15	24

Ft: 電流利得遮断周波数 f: フェムト(10<sup>-15</sup>)

HEMT特性のMMIC構造依存性を表2に示す。新規構造MMICのHEMTの特性は、従来構造MMICのそれよりやや劣るものの、60GHz帯で十分な利得を持つことがわかる。そこで、比較をした二つのMMICの構造とも、60GHz帯の回路に使用可能であることが確認できた。

#### 4 MMIC増幅器

二つの異なる構造を持つ4段60GHz帯GaAs HEMT MMIC増幅器を試作し、それらの性能と大きさを求め、比較した。

##### 4.1 回路構成

従来構造のMMICは、図1(a)に示されるように、その伝送線路としてコプレーナ線路を用いる。一方、新規構造のMMICは、図1(b)に示されるように、その伝送線路として、薄膜マイクロストリップ線路をバイアス回路及びスタブ用に、コプレーナ線路をRF(Radio Frequency)伝達方向の回路用にそれぞれ用いる。前述のように、コプレーナ線路は回路を低損失にできるという点で優れた伝送線路であり、また、薄膜マイクロストリップ線路はMMICを小型にできるという点で優れた伝送線路である。そこで、この新規構造のMMIC増幅器において、2種類の伝送線路を共存させることにした。

新規構造を持つ60GHz帯HEMT MMIC増幅器の回路構成を図3に示す。MMICは、ゲート長0.1μm、ゲート幅50μmのTゲート GaAs pseudomorphic HEMTを使用している。4段のHEMTと整合回路がMMICに集積されている。もう一つの従来構造のMMIC増幅器も同様の回路構成である。

##### 4.2 レイアウト設計

MMIC増幅器レイアウト設計例を図4に示す。従来構造の場合、伝送線路としてコプレーナ線路を用いるため、信号線の両側に幅の広いグラウンド用メタルパターンを置く必要があり、また、T分岐近傍などには信号線の両側のグラウンド用メタルパターンを電氣的に接続する役割を果たすブリッジを設ける必要がある。そこで、HEMTと近接スタブとを接近させて置くことができず、このことが増幅器の広帯域化を阻害していた。

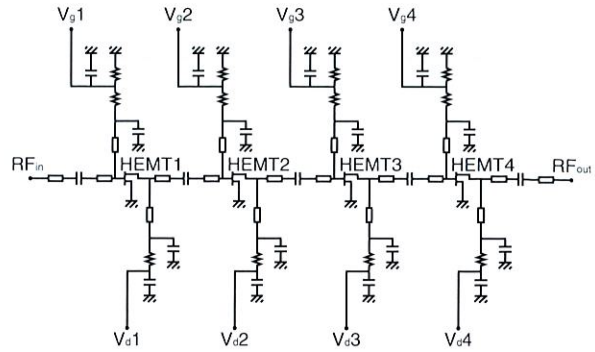


図3. 60GHz帯HEMT MMIC増幅器の回路構成 新規構造のMMICには、4段のHEMTとすべての整合回路、一部のバイアス回路が集積されている。

Circuit schematic of 60 GHz-band monolithic HEMT amplifier

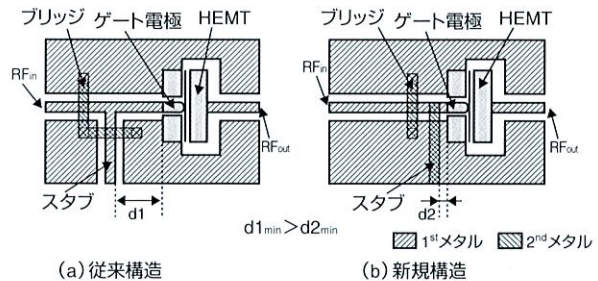


図4. MMIC増幅器レイアウト設計例 新規構造の方が、HEMTと近接スタブとをより接近させて置くことができ、小型化に有利である。

Examples of circuit layout design of monolithic amplifiers

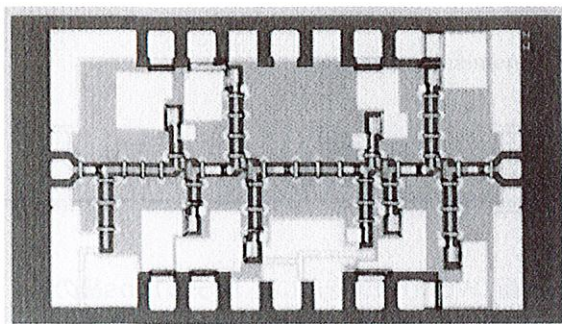
一方、新規構造の場合、スタブに薄膜マイクロストリップ線路を、RF伝達方向の線路にコプレーナ線路をそれぞれ使用できるため、HEMTと近接スタブとを従来構造より接近させて置くことができ、増幅器の広帯域化が可能になる。新規構造の場合のHEMTゲート電極と近接スタブとの最小距離は、従来構造の場合の約1/4である。

##### 4.3 特性

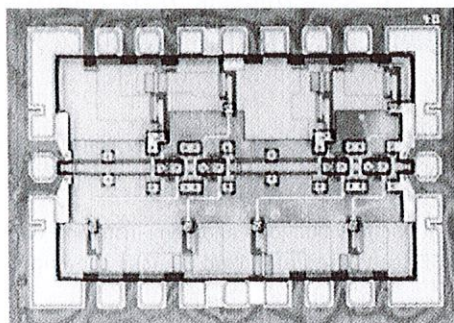
60GHz帯MMIC増幅器を図5に示す。従来構造のMMICのサイズは1.1mm×2.0mmであり、新規構造のMMICのサイズは1.1mm×1.55mmである。つまり、新規構造のMMICは従来構造のMMICより22.5%小型化が達成できた。

59.5GHzにおけるMMIC増幅器の電気特性を評価した。MMIC内各々のHEMTのバイアス条件は、ドレイン電圧1.5V、ドレイン電流7mAである。従来構造のMMICの利得は13.3dB、新規構造のMMICの利得は15.8dBである。

MMIC増幅器の周波数特性の測定値を図6に示す。新規構造のMMICは従来構造のMMICに比べて広い帯域にわた



(a) 従来構造 (1.1mm×2.0mm)



(b) 新規構造 (1.1mm×1.55mm)

図5. 60GHz帯MMIC増幅器 新規構造のMMICは、従来構造のMMICに比べ22.5%小型化された。  
60 GHz-band monolithic GaAs HEMT amplifiers

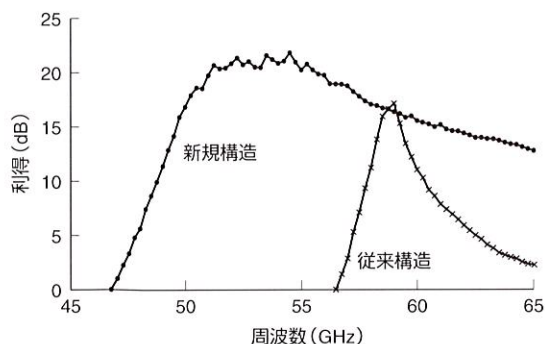


図6. MMIC増幅器の周波数特性(測定値) 新規構造のMMICは、従来構造のMMICに比べて広帯域にわたり利得が得られる。  
Measured gain of monolithic amplifiers

り高い利得が得られることがわかる。これは、新規構造のMMICがその伝送線路として、薄膜マイクロストリップ線路とコプレーナ線路の両方を用いて構成されているためである。

利得が15 dB以上得られる周波数帯域幅は、従来構造のMMICが1GHz、新規構造のMMICが11 GHzである。つまり、新規構造のMMICの方が従来構造より11倍広帯域化された。

## 5 あとがき

GaAs基板上にBCB薄膜誘電体層を持つ60 GHz帯HEMT MMIC増幅器を開発した。このMMIC増幅器は、その伝送線路として、バイアス回路及びスタブ用に薄膜マイクロストリップ線路を、また、RF伝達方向の回路用にコプレーナ線路をそれぞれ使用することにより、従来構造のMMICに比べ、サイズを22.5%小型にでき、周波数帯域幅を11倍にできた。開発したMMIC増幅器は、サイズが1.1 mm × 1.55 mm、利得が15 dB以上得られる周波数帯域幅が11 GHzである。この研究を通じて、BCB薄膜誘電体層を持つ新規構造のMMICがミリ波応用に対して非常に魅力的であることを確認した。

## 文献

- (1) Nishikawa, K., et al. "Millimeter-wave three-dimensional masterslice M-MICS". RFIC Symposium Digest. 1998, p. 239-242.
- (2) Ono, N., et al. "60-GHz-band monolithic HEMT amplifiers using BCB thin film layers on GaAs substrates". APMC Proc.1998, p.567-570.
- (3) Miyagi, T., et al. "MCM-D/L using copper/photosensitive-BCB multilayer for upper microwave band systems". 46th ECTC.1996, p.149-153.
- (4) Johnson, R. W., et al. "Multilayer thin film hybrids on silicon". ISHM Proc. 1988, p.365-373.



小野 直子 ONO Naoko

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー。  
ミリ波・マイクロ波アナログ回路の設計・評価の研究・開発に従事。電子情報通信学会会員。  
Mobile Communication Lab.



天野 実 AMANO Minoru

研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー。  
化合物半導体電子デバイス・集積回路の研究・開発に従事。電子情報通信学会、応用物理学会会員。  
Storage Materials & Devices Lab.



昆野 舜夫 KONNO Mitsuo, D.Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー室長附、工博。(財)新機能素子研究開発協会業務に従事。電子情報通信学会会員。  
Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.