

高周波送受信モジュール向け
小型・高放熱デバイス技術Small Size and High Heat Dissipation Device Technology for High
Frequency Transmit/Receive Module*鎌倉製作所
†同製作所(博士(工学))

要 旨

防衛・宇宙用途の合成開口レーダー(SAR: Synthetic Aperture Radar)等では、複数の高周波送受信モジュールの位相を制御することで電子走査を行うAESA(Active Electrically Scanned Array)の適用が主流になっている。AESAの性能向上のために、高周波送受信モジュールには高出力化の要求があり、GaAs(ガリウムヒ素)からGaN(窒化ガリウム)デバイスへの移行が進んでいる。三菱電機では長年、GaNデバイスを継続開発しており、その技術を適用した小型・高放熱デバイス技術を開発し、高周波送受信モジュールに適用している。今後、更なる高出力化を図って、防衛、宇宙機器に用いられるAESAレーダーの高性能化に貢献していく。

1. ま え が き

AESAは数百～数千素子の高周波送受信モジュールを使用している。AESAの高出力化は高周波送受信モジュールの高出力化によって実現する。当社では長年、GaNデバイスを継続開発しており、その技術を適用した高周波送受信モジュールも並行して開発を進めている。本稿では、高周波送受信モジュールに対する開発課題である、小型化と高放熱化を両立するGaNデバイス及びモジュール開発に対する取組みを述べる。

2. 高周波送受信モジュールの概要

図1に高周波送受信モジュールの概要(ブロック図)を示す。高周波送受信モジュールは送受信信号の増幅及び信号の利得・位相制御、送受信信号切替機能を持つ。モジュール内部には増幅回路として送信信号を増幅するための高出力増幅器(HPA: High Power Amplifier)、ドライバー増幅器(DA: Driver Amplifier)、受信信号を増幅するための低雑音増幅器(LNA: Low Noise Amplifier)を備えて、制御回路として信号の位相を制御する移相器、振幅を制御する減衰器、送受信信号を切り替えるスイッチ1、LNAを送信出力から保護するスイッチ2と終端を備えて、アンテナからの入力信号、アンテナへの出力信号はサーキュレーターによって振り分けている。

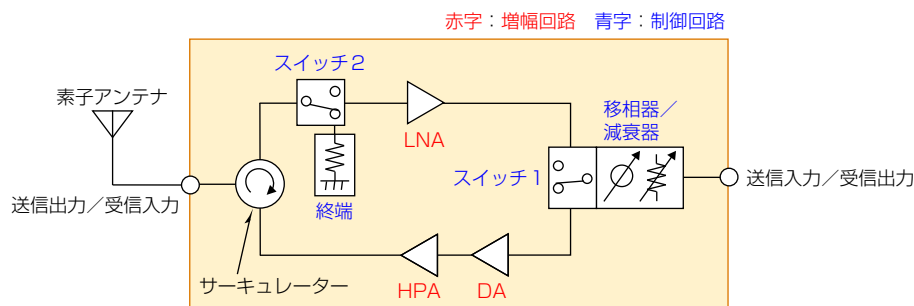


図1-高周波送受信モジュールの概要(ブロック図)

図2にAESAでの高周波送受信モジュールの実装形態を示す。ブリック型⁽¹⁾は、図1のモジュール構成品を一つの筐体(きょうたい)に実装し、素子アンテナに対して1対1で接続する。この構成では、故障等によるモジュール交換は1素子単位で容易に行えるため、整備性に優れている。ブレード型⁽²⁾は主に小型アンテナ向けで、一枚基板に複数素子の送受信モジュールを実装しており、1素子単位のブリック型に比べてシャシ等の構造体を省略できることから小型・軽量化が図

れる。タイル型⁽³⁾は主に薄型アンテナ向けで、アンテナ素子面と平行な面方向に高周波送受信モジュールを実装する。アンテナを薄くできるが、アンテナ1素子の限られた面積内にモジュールを実装する必要があるため、モジュールの小型化、すなわち高密度化が必要になる。GaNトランジスタは従来マイクロ波帯で使用されてきたGaAsトランジスタと比べて数倍の高電圧動作が可能であり、それに比して数倍の出力電力が期待できるが、発熱量も増加するため、トランジスタの性能、寿命を担保するためにトランジスタのチャンネル温度の低減、すなわち高放熱化が課題になる。

当社ではこれらの課題に対応する技術として小型・高放熱デバイス技術の開発を進めており、3章で開発事例を述べる。なお、本稿ではICをパッケージングしてモジュールに実装可能な状態としたものをデバイスと定義する。

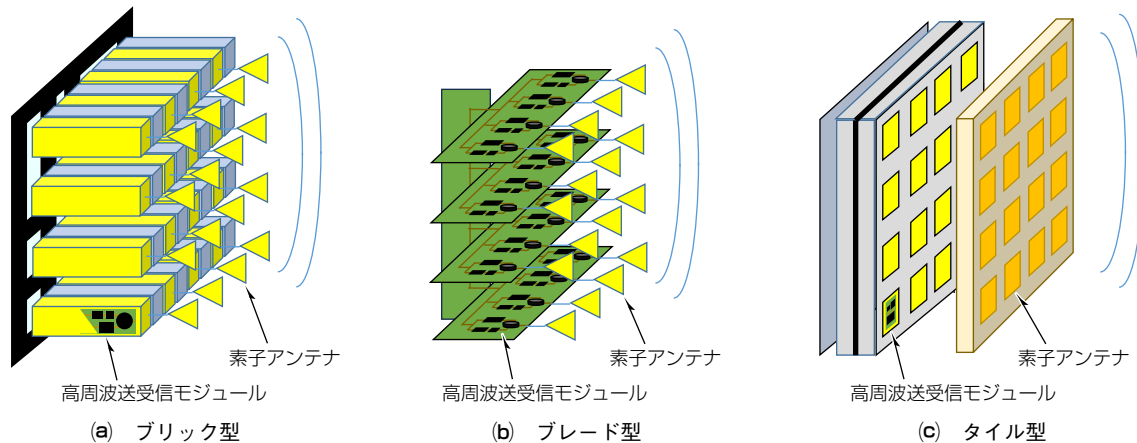


図2-AESAでの高周波送受信モジュールの実装形態

3. 小型・高放熱デバイス技術

3.1 小型・高放熱デバイス技術1 (SMART MDL)

当社で開発した表面実装非放射／SMART MDL⁽⁴⁾ (Surface Mounted Anti-Radiation Tr MoDuLe)は、電磁シールド化したデバイスを表面実装することでEMI(Electro Magnetic Interference)対策用の構造体を不要にし、低コストかつ小型化を実現したモジュールであり、ブリック／ブレード型に適用可能である。この節ではSMART MDLのGaN IC部に適用した小型・高放熱デバイス技術について述べる。

図3に小型・高放熱デバイスの実装断面模式図を示す。このデバイスの基材は低コストを目的に樹脂基板を選定し、金属カバーでGaN ICをパッケージする構造とした。樹脂基板は熱伝導性が低い対策として銅コインを挿入し、母基板側にも銅コインを挿入することで冷却板までの熱抵抗を低減させた。GaN ICと銅コインの間のCu-Mo(銅-モリブデン)キャリアはGaN ICと銅コイン及び樹脂基板との線膨張係数差の不整合を緩和している。小型・高放熱デバイスの裏面電極と母基板ははんだ接続しており、放熱シートを介して冷却板に母基板ごとねじ止める構造とした。

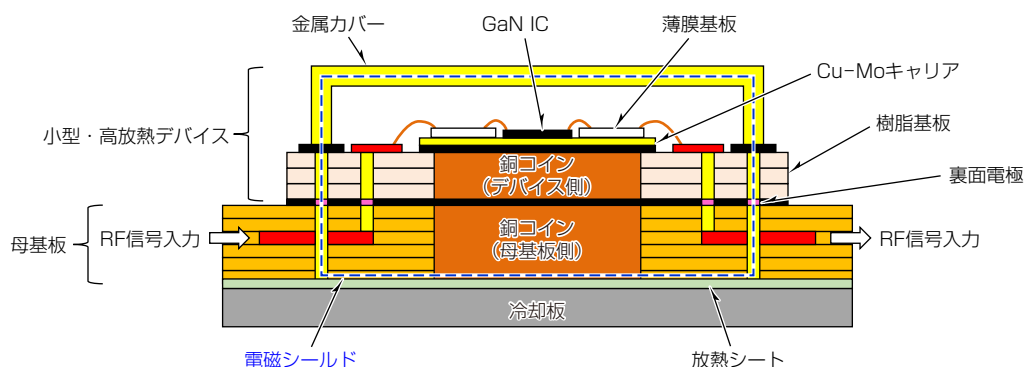


図3-小型・高放熱デバイスの実装断面模式図

メタルパッケージ、プラスチックパッケージ等、従来のパッケージ構造では、入出力のRF(Radio Frequency)信号ラインや端子が露出する構造になっており、基板との接続部からマイクロ波が放射することで発振や周波数リプルが発生する問題があった。これに対して、このデバイスは外周をグランド端子で囲ったRF信号端子とバイアス端子をデバイス裏面に配置し、はんだ接続する母基板も含めてRF信号ライン、バイアスラインを図3の青点線で示す疑似グランド壁で電磁シールドする構造にすることによってマイクロ波の放射を抑制するとともに、従来用いていた金属筐体や電波吸収体などを不要にし、高密度実装・小型化を実現した。また、従来のプラスチックパッケージではモールド材による出力低下が課題になっていたが、小型・高放熱デバイスではカバー内を中空構造にでき、出力低下の課題も解決している。

図4にSMART MDLの外観を示す。サイズ49×32mm(2素子)、質量17g、周波数はX帯で、小型・高放熱デバイス技術を適用した2素子一体の表面実装非放射モジュールである。ブリック型の送受信モジュールとして2素子ごとにモジュール交換が可能であり、小型化によって従来のブリック型配置に比べてアンテナ素子数を増やすことが可能になった。さらに、一枚のモジュール基板上に更に多数のデバイスを配置することも可能であり、ブレード型の高周波送受信モジュールにも適用可能である。

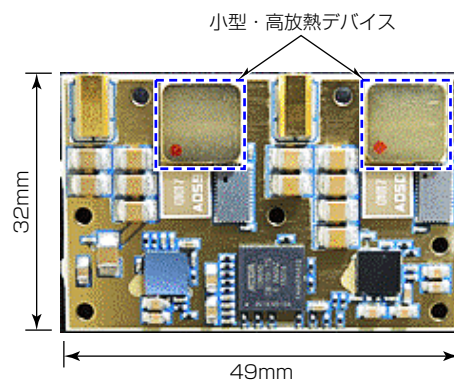


図4-SMART MDL

図5にSMART MDLの出力電力及び電力付加効率特性を示す。横軸は規格化した周波数で表記している。X帯で比帯域15%にわたって出力41.5～43dBm、効率29.0～33.5%の良好な性能が得られている。

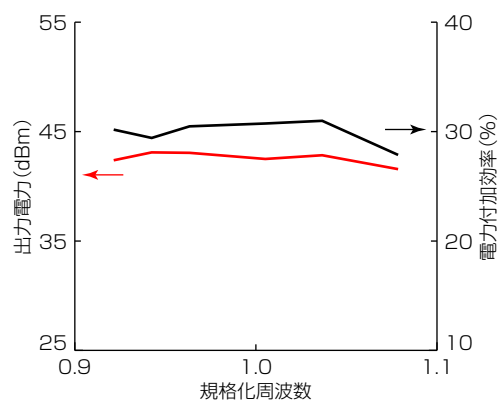


図5-SMART MDLの出力電力及び電力付加効率特性

3.2 小型・高放熱デバイス技術2 (eSTT MDL)

図2(c)のタイル型に対応する高周波送受信モジュールを実現するため、小型電磁シールド・高放熱/eSTT MDL⁽⁵⁾ (em-shielded Superior Thermal conductive Tr MDL)を開発した。タイル型アンテナに対応する高周波送受信モジュールは、配置制約上1素子当たりの実装面積をアンテナ素子ピッチよりも小型にする必要があり、高度な集積化が要

求される。一方、高集積化した高周波送受信モジュールでは放熱パスを十分確保することが難しく、高出力動作時の発熱量増加が原因でブリック型やブレード型と同等の送信出力を確保することが困難であった。eSTT MDLでは電気信号と放熱パスを別方向にすることで放熱パスを確保するとともに、高周波送受信モジュールに必要な増幅回路、制御回路の機能を一つのデバイスに集約することで小型化・高放熱化を実現した。

図6にeSTTの実装断面模式図を示す。増幅回路、制御回路に用いる各ICはデバイスパッケージ基板上に銅ピラーとハンダを介してフリップチップ実装し、IC背面にはヒートシンクを取り付ける。電気信号であるRF信号、バイアス、制御信号はパッケージ基板を介して図6で示すデバイス下面のモジュール基板に接続し、ICで発生する熱はヒートシンクを介して上面の冷却板に伝達される。電気信号をデバイス下面に、放熱パスをデバイス上面に分けたことでデバイス上面全面を放熱エリアとして使用でき、従来のブリック型と同等の優れた放熱性能を得ることができる。また、このデバイスの構成はフリップチップしたIC以外の部品は表面実装部品であり、従来デバイス製造で用いている部品間のワイヤー配線等のプロセスが不要になるため、組立てコストを抑制できる。

電磁シールドについては、IC、ヒートシンク、表面実装部品を樹脂でモールドした後に、デバイス外周をメタライズ（電磁シールドコーティング）することで実現する。電磁シールドによって近接デバイスへの電磁干渉を抑圧し、複数デバイスを近接に配置し、高密度実装が可能になる。

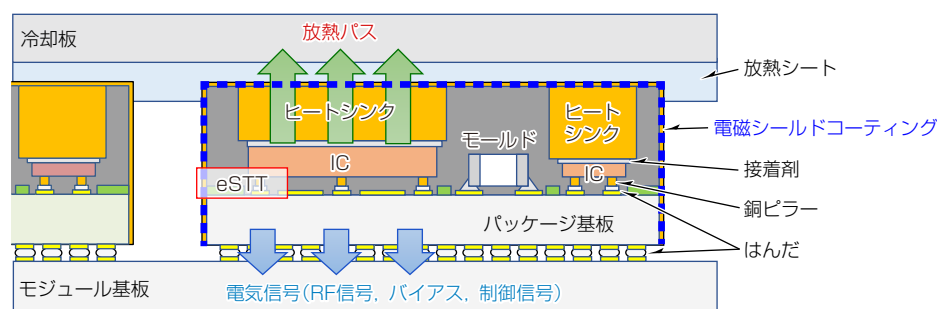


図6-eSTTの実装断面模式図

図7にeSTT及びメタルパッケージについて、GaNトランジスタのチャネル温度を熱解析した結果を示す。ブリック型のモジュールに実装した状態で解析を行い、IC上のGaNトランジスタと同じ発熱条件にしてチャネル温度を算出した。解析結果からチャネル温度に大きな差はなく、高密度なeSTTでもブリック型に実装したメタルパッケージと同等の放熱性能が得られることを確認した。

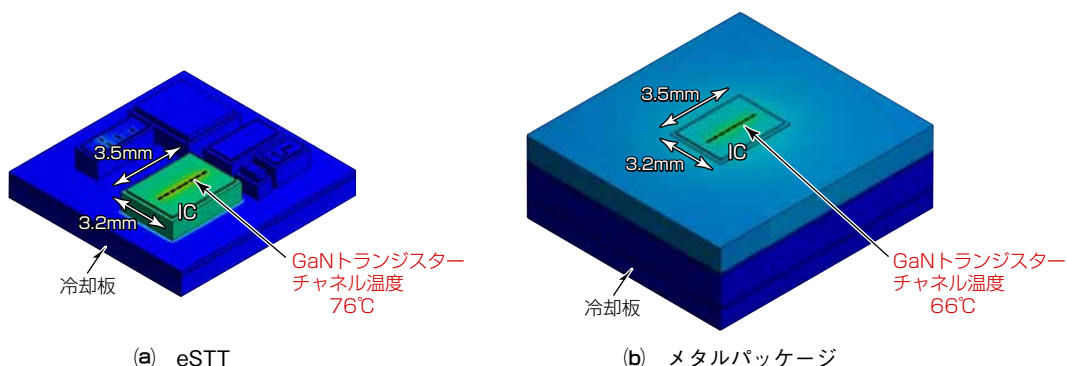


図7-熱解析結果

図8に当社で開発した試作eSTT MDLの外観を示す。モジュール基板上にeSTTを2個実装している。複数のICをワンパッケージ化することで一つのデバイスだけで増幅回路／制御回路の機能を備えている。試作eSTT単体は、寸法9.2×9.4mm(厚さ2.3mm)である。

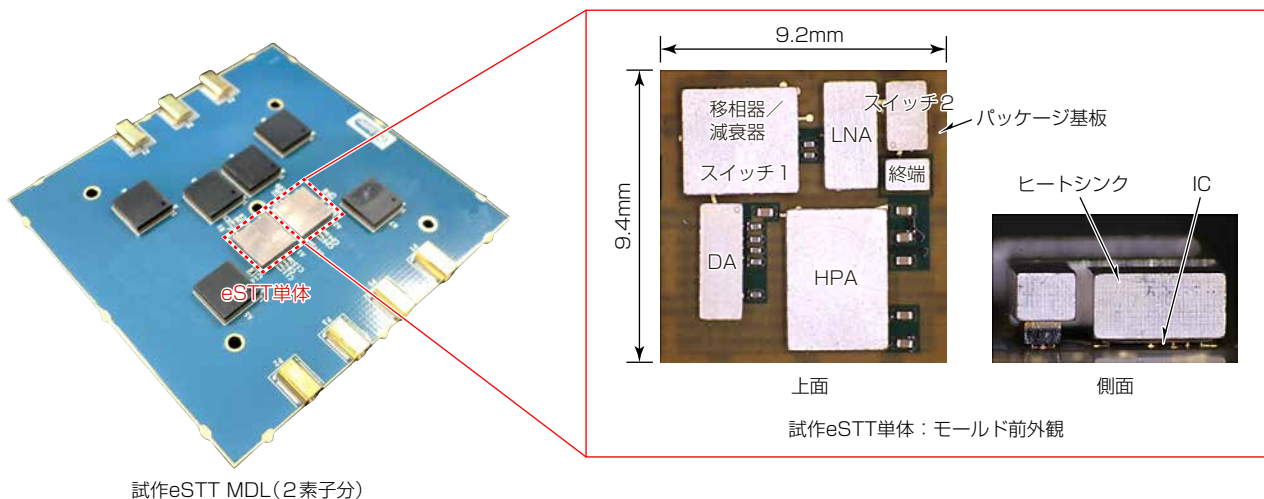


図8-試作eSTT MDL

図9に試作eSTT MDLの出力電力及び電力付加効率特性を示す。横軸は規格化した周波数で表記している。X帯20%の帯域幅で出力電力は43dBm以上、電力付加効率は15%以上が得られている。

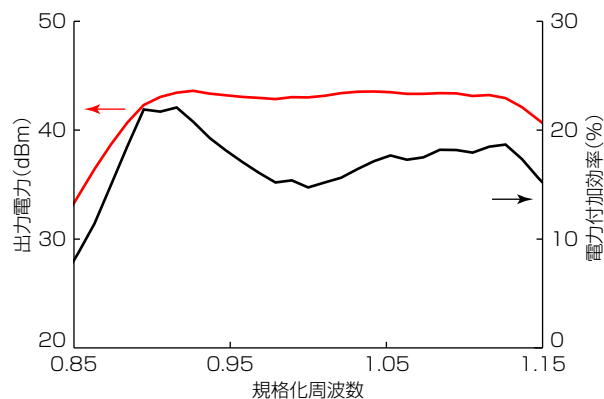


図9-試作eSTT MDLの出力電力及び電力付加効率特性

4. 更なる高放熱化に向けた今後の取組み

3章で小型・高放熱デバイス技術について述べた。更なる高出力要求に対しては、ICとヒートシンクの接続に、優れた熱伝導性の接合材を使用すること、ICの発熱をより広範囲に熱拡散するヒートシンク材を適用することが有効である。パワーデバイスの分野ではAg(銀)粒子を用いた焼結接合による高放熱化を実現しており⁽⁶⁾、半導体ICの接合材として金属粒子による焼結結合が適用可能か検討を開始した。ヒートシンク材としては、高熱伝導率材を複合化したAg-Diamond⁽⁷⁾や、熱異方性のあるグラファイトブロック⁽⁸⁾の製品適用化を検討している。今後、高周波のGaNデバイスにこれらの高熱伝導材を適用することで、高周波送受信モジュールの更なる高出力化を進めていく予定である。

5. む す び

高周波送受信モジュールの技術開発として、SMART MDLに適用した小型・高放熱デバイス技術、eSTT MDLに適用した小型電磁シールド・高放熱デバイス技術について述べた。今後、高熱伝導材を適用することで高周波送受信モジュールの更なる高出力化を図り、防衛、宇宙機器に用いられるAESAレーダーの高性能化に貢献していく。

参考文献

- (1) Rieger, R., et al. : GaN Based Wideband T/R Module for Multi-Function Applications, 2015 European Microwave Conference, 514~517 (2015)
- (2) Navarro, J.A. : Affordable electronically scanned apertures through heterogeneous integration, IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (2005)
- (3) Billstrom, N., et al. : X-band sub-antenna for low cost AESA radars, 2009 European Microwave Conference (2009)
- (4) Tarui, Y., et al. : X Band Low-Cost GaN TR Module with Anti-Radiation Structure, 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (2016)
- (5) Kimura, M., et al. : An X-band High Power Tile-Type GaN TR Module for Low-Profile AESA, 2021 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (2021)
- (6) 中原健太, ほか : 高温動作パッケージ構造, 三菱電機技報, **92**, No.3, 167~170 (2018)
- (7) 株アライドマテリアル : 次世代放熱基板開発(MAGSIC, Ag-Diamond, CPC-300)
<https://www.allied-material.co.jp/research-development/heatspreader.html>
- (8) 山田 靖, ほか : 高熱伝導グラファイトのパワー半導体モジュール放熱板への適用可能性, エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, **30**, 442~445 (2016)

~~~~~