

車載用低雑音GaAs HEMT増幅器

平山敏和*
相原育貴**
伊藤正康**

GaAs HEMT Low Noise Amplifier for Automotive Application

Toshikazu Hirayama, Yasuki Aihara, Masayasu Ito

要旨

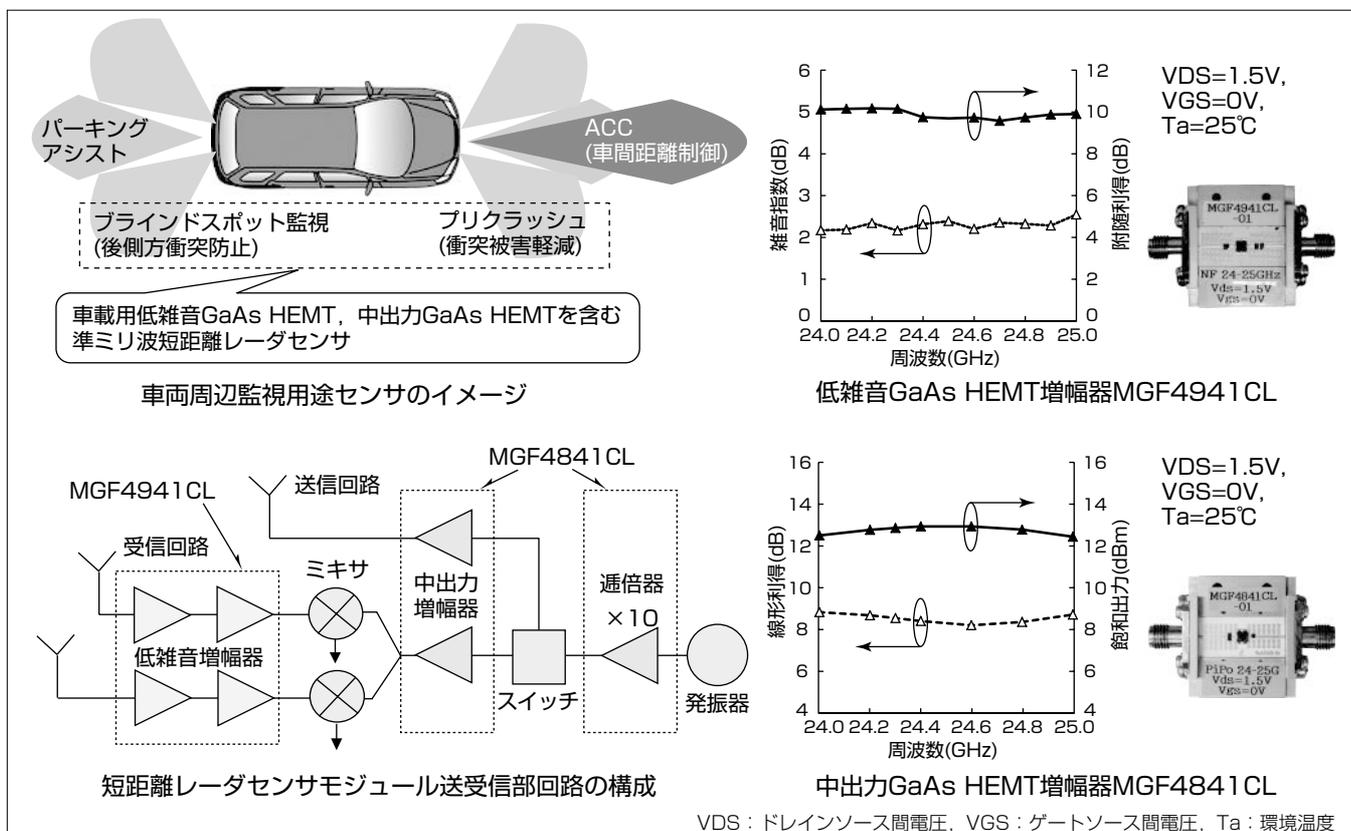
GaAs(ガリウムヒ素)製ディスクリートHEMT(High Electron Mobility Transistor)増幅器は低雑音性が特長であり、高性能なレーダセンサの受信段に利用されている。近年、自車と周辺物体間の距離・相対速度等を高精度に計測する車載レーダセンサモジュールの普及が進んでいるが、この内24GHz帯の電波を用いる短距離検知レーダ(Short Range Rader : SRR)には受信段にHEMT増幅器が使用されることが多い。レーダセンサモジュールが高級車から大衆車へも普及が進むにつれてHEMT増幅器も需要拡大の傾向にある。

三菱電機では、2006年から海外Tier1(ティアワン)メーカー(自動車メーカーに直接部品を供給する一次サプライヤー企業)からの要望の下、既存の衛星放送受信用低雑音HEMT増幅器を、車載SRR向け24GHz帯HEMT増幅器と

してチューニングした製品“MGF4941CL”の開発を進めた。車載部品向け試験規格AEC-Q101⁽¹⁾に合格し、車載向け品質管理認証プロセス(Production Part Approval Process⁽²⁾ : PPAP)を実施して2012年度に量産化を実現した。この製品は、低コストのプラスチックパッケージを使用し、雑音指数(NF)2.4dB、付随利得10.0dBと良好な特性を示す。

さらに、レーダセンサモジュールの受信部後段や送信部に使用される中出力HEMT増幅器“MGF4841CL”(飽和出力11.5dBm、線形利得8.5dB)の開発も進め、2014年度に量産化した。

本稿ではこれら車載用のディスクリートHEMT増幅器について製品化への過程を概観するとともに、更なる新規車載用途、市場への展開について述べる。



車載用HEMT増幅器のアプリケーション

自車と周辺物体との距離・相対速度等を高精度に計測する24GHz帯短距離レーダセンサモジュール送受信部回路の中核を担う増幅器として、当社開発品(低雑音GaAs HEMT増幅器 MGF4941CL, 及び中出力GaAs HEMT増幅器MGF4841CL)が使用される。

1. ま え が き

車載市場で、自車周辺の車両・物体との距離や、相対速度・方向等を高精度に計測するミリ波レーダセンサモジュールは、カメラ、赤外線センサと比して雨、雪、霧、逆光の自然条件に検出性能が影響を受けにくく、耐天候性要求の厳しいACC(Adaptive Cruise Control：車間自動制御システム)や、プリクラッシュセーフティシステム等で用いられる車両周辺監視用センサとして広く採用されている。ミリ波レーダセンサの周波数帯としては、長距離(50~200m)検知に強みを発揮してLRR(Long Range Radar)に主に使用される77GHz帯ミリ波レーダと、短距離(~50m)検知を担うSRRとして主に使用される24GHz帯準ミリ波レーダに分類される。SRRは、主として後側方及び前側方の車両を検知することによって衝突のリスクを軽減させる目的で使用されており、欧州市場では規制によって24GHz帯から77GHz帯(短距離検知目的としては79GHz帯)に移行しつつあるものの、比較的価格であることもあり、米国や中国を始めとする新興国市場では今後も24GHz帯での規模拡大が見込まれている。

MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits)主体の77GHz帯と異なり、波長の長い24GHz帯レーダセンサモジュールでは、基板側に回路を作りこむことによって増幅器等の機能デバイスにディスクリート半導体を用いることができる。特に受信段増幅デバイスについてはHEMT増幅器の低雑音性が際立っており、集積度に勝るCMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)系、SiGe(シリコンゲルマニウム)系の増幅器と較べても市場で一定のニーズがある。当社では、以前から衛星放送(Direct Broadcasting Satellite：DBS)受信アンテナの受信段増幅器として12GHz帯、及び20GHz帯のディスクリートHEMT製品を実用化しているが、この24GHz帯レーダセンサモジュールに搭載する受信段増幅器についても2006年から製品開発を進め、客先のモジュール製品化に合わせる形で2012年度に量産化を実現し、出荷を開始した。開発には低コスト化を基軸にDBS向け事業で培った半導体ウェーハプロセスの改善による特性均一化・歩留向上や、安定生産に適したパッケージ組立て・テスト工程最適化など、低コスト化技術の強みを車載用製品開発にも活用するとともに、開発要素を共通化して既存リソースを活用することで開発コストを最小限に抑制し、低コスト、高性能(低雑音性)を両立させた製品を市場投入している。また、これら車載製品群の品種展開時には、半導体チップ、パッケージ、組立てプロセスにこれまで性能・信頼性を確認済みの共通部品を使用することで、性能・信頼性検証期間を比較的短時間(~半年)で完了させ客先要求に迅速に応えることが可能となっている。

これらの活動の結果、2014年末までに欧州顧客を中心に

累計3,000万個近い車載用ディスクリートHEMT増幅器デバイスを生産・出荷している。

2. 車載用ディスクリートHEMT増幅器

量産中のHEMT増幅器製品MGF4941CL/MGF4841CLの共通パッケージの外形を図1に、特性の諸元を表1に示す。DBS向けに開発された中空プラスチックパッケージ構造を持つディスクリートHEMT増幅器製品をベースに、車載用信頼性の確保、検査系の整備を行い、これまで低雑音性に優れたMGF4941CL、及びより出力の高いMGF4841CLを製品化している。次に、設計に際して車載用製品として配慮した項目について述べる。

2.1 車載製品向け品質管理認証プロセス

ここでは、車載向け品質管理システムISO/TS 16949：2002(旧QS-9000：1998)で規定される、自動車開発時に搭載される部材に関する品質管理認証プロセスについて述べる。プロセス内容としては、客先と合意した製品設計記録、製品規格、設計(工程)FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)、工程フロー、コントロールプラン、信頼性試験、試作結果、工程能力調査等があり(表2)、客先への開示、及び事前承認を必要とする。欧州のTier1顧客に対しては、これと並行してドイツの自動車産業で標準の監査ツールVDA6.3⁽³⁾に基づくセルフオーディットを実施する必要があり、さらに客先の要求に応じてオーディットを受診し、製造に関する関連工場を含めた全ての生産ラインについて、一定以上の実力を示すことを要求される。当社では、この内

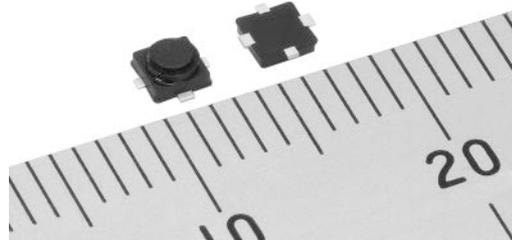


図1. MGF4941CL/MGF4841CLの共通パッケージの外形

表1. MGF4941CL/MGF4841CLの諸元

形名		MGF4941CL
項目	条件	
ドレイン電流	VDS = 1.5V, VGS = 0 V	25~45mA
ゲート-ドレイン降伏電圧	IG = -10μA	< -3 V
ゲート-ソース遮断電圧	VDS = 1.5V, IDS = 500μA	-0.1~-1.5V
雑音指数	VDS = 1.5V, VGS = 0 V,	2.4dB
利得	f = 25.2GHz, Ta = 25°C	10.0dB

形名		MGF4841CL
項目	条件	
ドレイン電流	VDS = 2.5V, VGS = 0 V	30~80mA
ゲート-ドレイン降伏電圧	IG = -10μA	< -4 V
ゲート-ソース遮断電圧	VDS = 2.5V, IDS = 500μA	-2.0~-0.1V
飽和出力	VDS = 1.5V, VGS = 0 V,	11.5dBm
線形利得	f = 24.3GHz, Ta = 25°C	8.5dB

IG：ゲート電流、IDS：ドレインソース間電流、f：周波数

表 2. 車載製品向け品質管理認証プロセス

項目	試験記録	
設計記録	客先と合意した納入規格	
設計FMEA	ウェーハ	設計FMEA(ウェーハ)
	組立	設計FMEA(組立)
	検査	設計FMEA(検査)
工程フロー図	ウェーハ	工程フロー図(ウェーハ)
	組立	工程フロー図(組立)
	検査	工程フロー図(検査)
工程FMEA	ウェーハ	工程FMEA(ウェーハ)
	組立	工程FMEA(組立)
	検査	工程FMEA(検査)
コントロールプラン	ウェーハ	コントロールプラン(ウェーハ)
	組立	コントロールプラン(組立)
	検査	コントロールプラン(検査)
測定システム解析	NF/Sパラメータ検査解析レポート	
寸法検査結果	AEC-Q101 test#12(寸法検査)	
材料記録・性能テスト結果	ウェーハエピ, 金ワイヤ, フレーム, パッケージ部材, 銀ペースト受け入れ検査レポート	
初期工程調査	初期ロット工程能力レポート(DC, Sパラメータ, NF)	
試験所の資格の証明書	ISOに基づく装置校正管理実施資料	
製造サンプル	製造履歴管理資料(検移票, 検査票等)	
マスタサンプル	組立ロットごとにQATサンプルを保存	
部品提出保証書	PSW(Part Submission Warrant)	

QAT: Quality Assurance Test

表 3. 車載用途ディスクリート部品向け信頼性試験

#	試験項目	試験条件	サンプル数	不良率(不適合品数/サンプル数)
1	ストレス試験前後電気特性検査		全数	--
2	前処理			
3	外観検査			
4	パラメトリック検証			
5	高温逆バイアス試験	Ta=150℃, VG=-2.4V, VD, VS=grounded, 500時間	77	r/n=0/77
6	高温ゲートバイアス試験	Ta=150℃, VG=-2.0V, VD=2.0V, VS=0V, 500時間	77	r/n=0/77
7	温度サイクル試験	-55℃/150℃, 400サイクル	77	r/n=0/77
8	オートクレーブ試験	121℃/100%RH, 96時間	77	r/n=0/77
9	高温高湿逆バイアス試験	Ta=85℃, 85%RH, VG=-2.4V, VD, VS=grounded, 1,000時間	77	r/n=0/77
10	静電気放電耐性試験	人体モデル(100pF, 1.5KΩ, 3回放電) マシンモデル(200pF, 0Ω, 3回放電)	30	r/n=0/30
11	DPA(Destructive Physical Analysis)	高温高湿逆バイアス試験と温度サイクル試験実施済みのサンプル	4	r/n=0/4
12	物理的寸法		30	r/n=0/30
13	端子強度		30	r/n=0/30
14	定加速度試験	Y1, 15kG	30	r/n=0/30
15	振動, 可変周波数試験	20Hz-2,000Hz-20GHz, 16分, X, Y, Z	30	r/n=0/30
16	機械的衝撃試験	1,500G, 0.5秒 X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2 3回	30	r/n=0/30
17	はんだ熱耐性	IR reflow (max. 260℃, 10秒, 3回)	30	r/n=0/30
18	はんだ濡れ性		10	r/n=0/10
19	ワイヤボンディング引っ張り強度		5	r/n=0/5
20	ワイヤボンディングシェア強度		5	r/n=0/5
21	ダイボンディングシェア強度		5	r/n=0/5

容に基づき、現在取引のある複数の客先からの生産ラインオーディットを受診しており、ウェーハ生産工場(高周波光電デバイス製作所)、及びパッケージ組立て・テストを担う協力工場1社について、これらの客先からの承認を得ている。

2.2 車載用途ディスクリート半導体部品向け信頼性試験、ウェーハプロセスでの信頼性確保事例

デバイスの信頼性保証に関しては、欧州で一般的な車載用途ディスクリート半導体部品向けの試験規格であるAEC-Q101に基づき信頼性試験を実施、試験に耐え得る信頼性を保持していることを確認した上で、車載製品向け品質管理認証プロセスPPAPに則り主要客先に報告、承認されることによって“AEC-Q101認証”を謳(うた)っている。現時点で、先に述べた2品種を含めたディスクリートHEMT増幅器製品5品種についてAEC-Q101認証済みである。試験内容及び実施数量について表3に示す。

一般にHEMT増幅器デバイスでは、低コスト化のためプラスチックなど非気密パッケージを使用し、半導体チップ自身での耐湿性が信頼性の確保上大きな課題となる。この車載向け製品開発では、DBS向けよりはるかに厳しい信頼性(耐湿性)規格を達成するために様々な工夫が適用さ

れている。一例として図2にゲート電極保護膜形成時のクリーニング工程を示す。HEMTトランジスタのゲート電極を形成した後の保護膜形成工程で、保護膜を形成する直前にゲート近傍の半導体表面に微量に残存するレジスト残留物及び自然酸化膜を除去するクリーニング工程にプラズマ処理を採用し、半導体層と保護膜の付着性を向上させることに成功、高温・高湿度環境下でのGaAs表面劣化による特性変動を抑制することを実現した。

2.3 全数Sパラメータ検査による初期不良率削減

従来、DBS市場向け製品として出荷していた製品群を、より品質要求が高

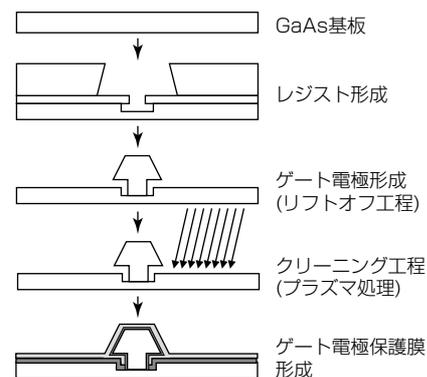


図 2. ゲート電極保護膜形成時のクリーニング工程

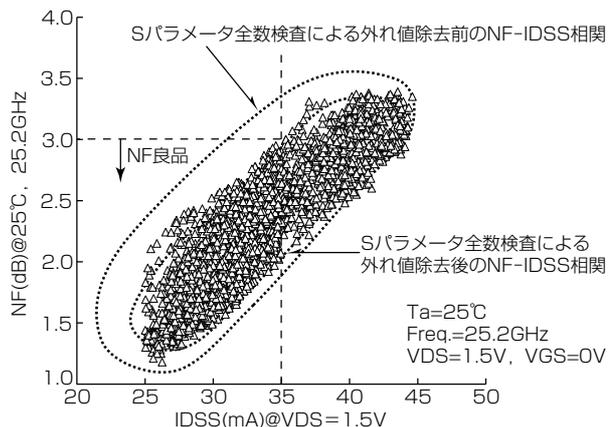


図3. 車載用途HEMT増幅器MGF4941CのNF-IDSS相関

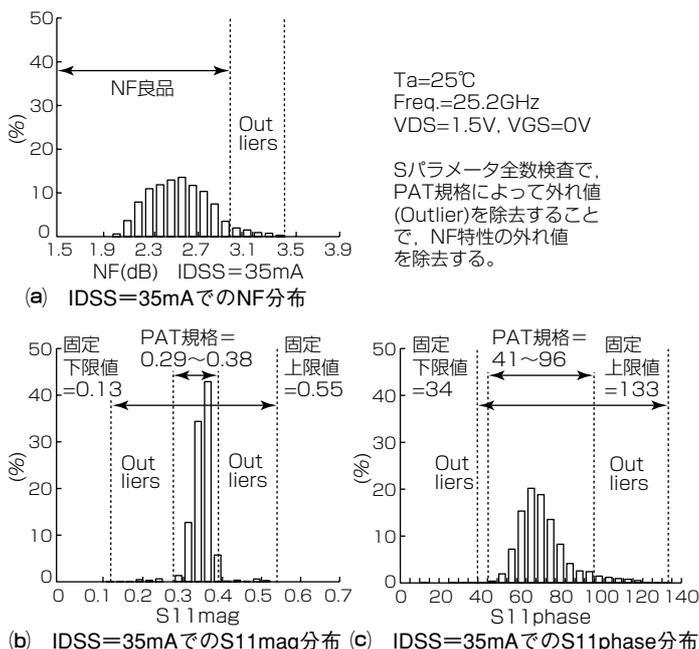


図4. 全数Sパラメータ PAT検査による初期不良率削減
 い(初期不良率100ppm未満)車載用途製品として出荷を可能にするために、通常であれば、高周波特性(低雑音増幅器であれば雑音指数(NF))を全数検査する方策を検討すべきであるが、24GHz帯での高周波特性はデバイスと測定治具の接触に敏感であるため短時間でのテストが非常に困難で、大量生産品の全数検査は現実的でない。そこで、図3に示すように簡便なDC(直流電気特性)の測定で確認できるドレイン電流(IDSS)と、NFとが相関関係を持つことに着目してIDSSで規格を設けることとし、かつ周波数特性の確認のため、Sパラメータの中で一番NFと相関を持つS11の全数検査規格に部品平均テストリミット(Part Averaging Test⁽⁴⁾:PAT)を適用する検査手法を提案し、顧客承認の上適用している。図4では、図3のIDSS=35mA近傍にある製品に対してSパラメータ全数検査を行う際、通常の検査規格設定だけでは除去しきれない、S11が正規分布から外れた製品(実際、NFについても正規分布から外れている可能性が高い)を除去する手法を示している。この手法をIDSS全範囲内で実施することによって、規格内(正規分

表4. V2X用途向けMGF4841CLの特性

項目	条件	評価結果
雑音指数		1.35dB
線形利得	VDS = 2.5V, IDS = 25mA,	14.4dB
最大入力電力	f = 5.8~6.0GHz, Ta = 25°C	8.0dBm
1dB利得圧縮時出力		12.6dBm

布内)のNFを選ぶことができる(図3)。

実際の製品検査工程では、検査平均テストリミット、統計的ビンリミット(Statistical Bin Limits⁽⁵⁾)機能を実装したSパラメータ全数検査システムを独自開発し、これを量産適用している。

3. 他の車載用途市場への展開

今後着目すべき車載用途新規製品市場として、車-車間、車-インフラストラクチャー間通信等を統合的に対象とする“V2X”市場(Vehicle to X, X=Vehicle, Infrastructure, etc)が挙げられる。周波数帯域としては欧州を中心に5.9GHz帯の使用が検討されており、今回開発した車載用途HEMT増幅器 MGF4941CL, 及びMGF4841CLの新たなアプリケーションとして、既に評価ボード開発を含めて検討を開始、複数の客先向けに拡販を始めている。

表4に、V2X用途向けの周波数帯(5.8~6.0GHz)で評価したMGF4841CLの特性を示す。

4. むすび

車載用低雑音GaAs HEMT増幅器MGF4941CL, 及び中出力GaAs HEMT増幅器MGF4841CLを開発し、車載用途ディスクリート部品向け試験規格AEC-Q101に合格し、車載製品向け品質管理認証プロセス(PPAP)を実施し、量産化を実現した。この製品で培った車載用途製品開発の知見を活用し、今後の新規市場向け(V2X)製品開発を加速する。

参考文献

- (1) AEC-Q101 Rev. C STRESS TEST QUALIFICATION FOR AUTOMOTIVE GRADE DISCRETE SEMICONDUCTORS, Automotive Electronics Council (2005)
- (2) Production Part Approval Process 4th Edition, Automotive Industry Action Group (2006)
- (3) VDA6. 3 Quality Management in the Automotive Industry/Volume 6 Part 3 Process Audit, 1st Edition, Verband der Automobilindustrie (1998)
- (4) AEC-Q001 Rev. D GUIDELINES FOR PART AVERAGING TESTING, Automotive Electronics Council (2011)
- (5) AEC-Q002 Rev. B GUIDELINES FOR STATISTICAL YIELD ANALYSIS, Automotive Electronics Council (2012)