X 帯民生 GaN HEMT を用いた搭載用固体電力増幅器の 動作条件による RF 特性と宇宙環境耐性評価^{*1}

Evaluation of RF Characteristics Affected by Operational Conditions and Space Environmental Testing of X-band SSPA Using COTS GaN HEMT

小 林 雄 太^{*2}・山 本 善 一^{*2}・川 崎 繁 男^{*2}
Yuta KOBAYASHI, Zenichi YAMAMOTO and Shigeo KAWASAKI

Key Words: Space Engineering, X-band COTS GaN HEMT, Space Communication, Solid State Power Amplifier, Space Environmental Testing

Abstract: GaN HEMT has been expected to satisfy requirements being used in space as amplifying devices of future high-efficiency onboard SSPAs due to its excellent properties such as robustness in a harsh environment, applicability to high frequency and high power operation. However, in X-band, the most important frequency band for space communication at this moment, evaluation of GaN HEMT to prove the space usage has not been conducted yet because ensuring a steady supply of X-band GaN HEMT devices is still difficult due to current collapse phenomena. Therefore, in this research, evaluation of RF characteristics affected by operational conditions and space environmental testing of X-band HPA using COTS GaN HEMT was conducted to secure the space usage.

記 号 の 説 明

V_d : ドレイン電圧[V]
 V_g : ゲート電圧[V]
 I_d : ドレイン電流[A]
 I_{dset} : ドレイン電流設定値[A]
 PAE : 電力付加効率[%]
 η : ドレイン効率[%]
 P_{in} : RF 入力電力[dBm]
 P_{out} : RF 出力電力[dBm]
 $Gain$: 利得[dB]
 $IM3$: 3 次相互変調ひずみ[dBc]
 P_{sat} : 飽和出力電力[dBm]

1. は じ め に

近年、宇宙機において X 帯 (8 GHz 帯) 通信システムが担う役割はますます大きくなっている。これは高速大容量通信、高精度軌道決定、科学ミッションの実施といった通信機器に関わる要求がミッションの多様化と共に、近地球・深宇宙を問わず大きくなっていることに起因する¹⁻³⁾。これらの要求は宇宙機からの通信品質を劣化させることなく大電力高効率な通信を実現し、地上での SN (Signal-to-Noise ratio : 信号対雑音比) を改善するという共通の要求に換言できる。しかし、宇宙機においては、サイズ・重量・消費電力といった厳しい制約が生じることに加えて高い信頼性が求められることによって、保守的な機器を用いざるを得ないためこの要求を満たすことは容易で

はない。一般に、宇宙機において通信システムは全消費電力の約 20 % を占め、その中でも電力増幅器は約 15 % を占めており、電力増幅器の高効率化は宇宙通信のみならずバス機器全体における長年の課題の一つである。搭載系電力増幅器は、TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier : 進行波管増幅器) と SSPA (Solid State Power Amplifier : 固体電力増幅器) に大別され、現状の宇宙機においては X 帯の高出力増幅器には TWTA が使用されている⁴⁾。これは TWTA の効率が 60 % 程度と高いことに起因するが、TWTA は SSPA と比べた場合、フットプリントの大型化、短命化、真空管利用による振動・衝撃耐性の劣化、高電圧動作に伴う真空移行中の放電リスクの増加等、効率を除くあらゆる面で宇宙機への適用には不利である。一方で、主に 20 W 未満の出力電力で用いられる SSPA は、既存の機器では GaAs (Gallium Arsenide : ヒ化ガリウム) を増幅素子として総合効率 20 % 程度となっている。つまり、SSPA で TWTA 並みの高効率化が実現できれば、これらの問題は全て解決し結果的に宇宙機の通信性能の大幅な向上へとつながられる⁵⁾。

加えて近年、地上の通信系においても急速に高効率な増幅器の研究は進められており、特にワイドバンドギャップ素子を用いた高効率 SSPA の研究は GaN (Gallium Nitride : 窒化ガリウム)、SiC (Silicon Carbide : 炭化ケイ素) デバイス等を中心に様々な周波数で進められている。第 1 表にこれらの物性値の比較を示すが、GaN はワイドバンドギャップ、高耐圧、高熱伝導率等の特徴を保持し、絶縁破壊電圧と電子飽和速度の積である Johnson's figure of Merit (高周波/ハイパワーデバイスに対しての性能指標) を比較すると、 $GaN > 4H-SiC > GaAs$ となることから高出力・高周

^{*1}©2013 日本航空宇宙学会

平成 24 年 5 月 21 日原稿受付

^{*2}宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 通信・データ処理グループ

第1図 S帯 GaN 研究成果

第2図 X帯 GaN 研究成果

波増幅器に最適なデバイスと考えられる⁶⁾。加えて、500℃以上での動作確認結果や放射線照射に対する高いロバスト性がL帯(1GHz帯)・S帯(2GHz帯)を中心に報告されている⁷⁻¹³⁾。しかし、これらはGaNデバイスが安定供給可能な低周波に限定したものとなっており、さらにはその多くはDC(Direct Current:直流)特性の評価となっている。X帯に関しては、NASA(National Aeronautics and Space Administration:アメリカ航空宇宙局)がDCとRF(Radio Frequency:高周波)特性に関する放射線試験結果を報告しているが¹⁴⁾、この報告では、GaNデバイスはDCバイアスのみの状態で放射線を照射され、照射前後のRF特性を評価しているため、放射線照射環境において長時間連続動作させる宇宙用途を想定したRF特性に関する放射線試験結果はX帯以上のGaN HEMT(High Electron Mobility Transistor:高電子移動度トランジスタ)では報告されていないと言える。X帯以上では高電圧動作時にトランジスタのオン抵抗値が高くなってしまい、結果的に損失が大きくなる現象である電流コラプスの問題が残存するため、X帯以上のGaN HEMTのこうした環境下での振舞いは特に未知数であり、その特性評価は宇宙用途での使用には必須である。

ここで、第1図、第2図にS帯、X帯に関する近年のGaNを用いた増幅回路の研究成果として出力電力と効率をまとめる¹⁵⁻²⁷⁾。S帯においては、F級や逆F級といった動作級の回路を用いることで、効率80%以上といった研究成果も出てきており、その出力レベルもkWクラスまで達している。一方、X帯については、MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit:モノリシックマイクロ波集積回路)のPW(Pulse Wave:パルス波形)動作で効率50%以上の成果は見られるものの、CW(Continuous Wave:連続波)動作では効率は40%台に留まり、出力レベルも数十

第1表 物性値比較

	GaAs	4H-SiC	GaN
Band gap [eV]	1.4	3.3	3.4
Relative permittivity	12.8	10.0	9.5
Critical electric field [10^6 V/cm]	0.4	3.0	3.3
Saturation electron velocity [10^8 cm/s]	2.0	2.0	2.5
Thermal conductivity [W/cmK]	0.5	4.9	2.1

第2表 GaN HEMT 仕様

	F344	TGI7785-25L
Type	Internal-matched GaN HEMT on SiC (class AB)	Internal-matched GaN HEMT on SiC (class AB)
Frequency	5.8-8.5 GHz	7.7-8.5 GHz
Output power	$P_{sat} > 43.6$ dBm	$P_{sat} > 44.5$ dBm
Small signal gain	> 13.5 dB	> 12.0 dB
Efficiency	$PAE > 40\%$	$PAE > 33\%$
Drain voltage and current	$V_d: 24$ V, $I_{dset}: 1.0$ A	$V_d: 24$ V, $I_{dset}: 1.4$ A

(a) F344

(b) TGI7785-25L

第3図 SSPA BBM 外観

Wクラスが主となり、高出力・高効率に関して研究段階にあることが分かる。これは、前述の通りX帯以上の周波数では、電流コラプスの問題が未解決なこともありデバイスの安定供給に至っていないことがその理由として挙げられ、X帯以上においてはCOTS(Commercial Off-The-Shelf:民生品)のGaNデバイスも極端に少なく動作条件に関する報告も少ない。

そこで、本研究では民生品の20Wクラスの内部整合型X帯GaN HEMTデバイスを用いて、高出力・高効率な搭載用SSPAの実現に向けて、HPA(High Power Amplifier:高出力電力増幅器)のCW動作時の動作条件(ドレイン電圧、ゲート電圧、動作温度)の効率やひずみ特性といった通信品質を含むRF特性への影響の調査、ならびに、熱真空試験・放射線試験を通した耐宇宙環境性能評価を実施し、X帯の民生GaN HEMTデバイスの搭載用SSPAとしての使用に関して、技術的な知見を獲得することをその目的とする。

2. 評価対象回路

本研究では、X帯民生GaNデバイスとして、住友電気工業株式会社のF344と、株式会社東芝のTGI7785-25Lを用いた。各々の仕様を第2表に示す。また、両デバイスを用いて試作したSSPAのBBM(Bread Board Model:機能試験モデル)の外観を第3図に示す。

ここで、次章以降における動作条件の影響による宇宙環境耐性の評価における比較対象結果として、各回路の定格動作時の入出力特性とひずみ特性を第4、5図に示す。本測定では、入出力特性を8.50GHzで取得し、ひずみ特性は、 $f_1=8.49$ GHzと $f_2=8.50$ GHzの2トーン入力時のIM3(3rd order Inter Modulation:3次相互変調ひずみ)を取得している。

第4図 定格動作時入出力特性 (F344, TGI7785-25L)

第6図 入出力特性測定系ブロックダイアグラム

なお、入出力特性における *Gain* (利得), *PAE* (Power Added Efficiency: 電力付加効率), η (ドレイン効率) は各々以下の式(1)~(3)より算出される。また、*IM3*の結果では、中心周波数の低周波側に現れる $2f_1-f_2$ を Low, 高周波側に現れる $2f_2-f_1$ を High とそれぞれ表記している。第6図に入出力特性取得時の測定系ブロックダイアグラムを、第7図にひずみ特性取得時の測定系ブロックダイアグラムをそれぞれ示す。

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{V_d \cdot I_d} \quad (1)$$

$$Gain = P_{out} - P_{in} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{V_d \cdot I_d} \quad (3)$$

3. 動作条件による RF 特性・宇宙環境耐性評価

3.1 評価項目 動作条件による評価としては、主にバイアス条件、周囲条件が存在する。本研究では、バイアス条件としてドレイン電圧、ゲート電圧を定格値から変化させた際の特性を評価し、周囲条件として、温度、熱真空、放射線条件下での振る舞いを評価した。はじめにバイアス条件のドレイン電圧に関しては、Fanning らの報告²⁸⁾にあるように、ドレイン電圧の低下に伴う高効率化の傾向が見られた。次に、ゲート電圧によるバイアス条件の評価については、今回使用しているデバイスがいずれも内部整合型であることから、ゲートバイアス条件の変化が増幅回路の動作級に影響を与えることはなく、低出力時のひずみ特性の

第5図 定格動作時ひずみ特性 (F344, TGI7785-25L)

第7図 ひずみ特性測定系ブロックダイアグラム

第3表 環境試験条件

Test	Conditions
Temperature	-5, 25, 55 degree of Celsius
Thermal vacuum	-20 to 60 degree of Celsius, 1E-4 to 1E-3 Pa
Radiation	⁶⁰ Co, Total Ionizing Dose: 320 krad, (20 krad/h) Accelerated aging test: 100 degree of Celsius, 168 hours

改善のみが見られた。しかし、これらのバイアス条件の評価では、今回評価に用いたデバイスが民生品であり、各メーカーの設計時の設計条件やパラメータが不明であることから、GaN デバイスの普遍的な振る舞いは議論できない。したがって、本論文では、主として周囲条件を動作条件として扱い、その RF 特性への影響を調査することで GaN デバイスの宇宙環境耐性を評価する。周囲条件に関しては、Lee らによって、動作温度を低温に保つことで効率の向上が見込まれることが報告されている²⁹⁾。しかし、これは大気中のみの評価であり、真空中の温度変化や大気中・真空中それぞれの動作温度条件変化時の振る舞いは未評価である。加えて、放射線照射環境下での RF 連続動作についても、その評価は十分になされていないため、本論文では、これらを総合的に評価し、GaN HEMT の宇宙環境耐性について知見を得ることを狙いとする。これらの環境試験条件を第3表にまとめる。

3.2 温度試験 温度試験では、動作温度を常温 (25 °C)、低温 (-5 °C)、高温 (55 °C) と変化させた際の RF 特性を取得した。試験は、第8図のブロックダイアグラムに示

第9図 F344 入出力特性 (温度試験)

第10図 F344 ひずみ特性 (温度試験)

第8図 温度試験測定系ブロックダイアグラム

す構成で実施され、各増幅器は、恒温槽内でファン付のヒートシンクに設置された。低温、常温、高温、各温度条件時の増幅器のケース温度は、F344 で 0.2 °C, 29.8 °C, 59.8 °C の定常値を示し、TGI7785-25L では 1.1 °C, 30.3 °C, 61.3 °C をそれぞれ示した。第9図、第10図にそれぞれ F344 の入出力特性とひずみ特性を示し、第11図、第12図に TGI7785-25L の同様の結果を示す。第9図、第11図より、常温動作時を基準とした場合、低温動作において、飽和出力電力、利得が向上し、43 dBm 出力時と比較した場合、F344 で PAE が 1.0 % 上昇し、TGI7785-25L においても 2.2 % PAE が上昇した。一方で、高温動作においては、飽和出力電力、利得が劣化し、43 dBm 出力時に常温動作と比較した場合、F344 で PAE が 3.9 % 低下し、TGI7785-25L において、2.4 % 低下した。これらは、低温動作と比較して、高温動作では、温度が高い分、電子の運動度が増し、結果的にドレイン電流値が増加していることに起因すると考えられる。今回は、排熱が十分に行っていたことに加えて、F344、TGI7785-25L いずれも GaN on SiC のデバイスとなっている

第11図 TGI7785-25L 入出力特性 (温度試験)

第12図 TGI7785-25L ひずみ特性 (温度試験)

ことから、SiC の高い熱伝導率により、20 W の高出力動作においても、温度試験による影響は軽微な結果となったと考えられる。

次に、第10図、第12図より、動作温度に対するひずみ特性の変化は、F344、TGI7785-25L いずれにおいても、ほとんど見られなかった。つまり、同一バイアス条件下での温度に関する周囲条件の変化は、ひずみ特性には大きく影響はしないと言える。

3.3 熱真空試験

熱真空試験としては、搭載機器に要求される動作維持温度に基づく温度条件と高真空領域の真空度の条件を付与した。F344、TGI7785-25L の増幅回路は、300*400*10 mm のアルミ板の治具を介して、熱真空試験チャンバの底板に固定され、底板の温度を制御する形で、試験を実施した。第13図に試験系のブロックダイアグラムを示す。第3表に示す通り、低温最悪条件として -20°C、高温最悪条件として 60°C の条件を与え、入出力特性ならびに、連続動作時の増幅器ケース温度の特性をそれぞれの増幅回路について個別に取得した。F344 の常温真空時の結果と比較した入出力特性、低温最悪、高温最悪条件時の連続動作における温度特性をそれぞれ第14図、第15図に示す。また、第16図、第17図に TGI7785-25L の同様の結果を示す。第14図、第16図より、常温真空時を基準とした場合、低温真空動作において、飽和出力電力、利得が向上し、最大効率時と比較した場合、F344 で PAE が 6.5 % 上昇し、TGI7785-25L においても 2.0 % 上昇した。一方で、高温真空動作においては、飽和出力電力、利得が劣化し、最大効率を常温真空動作時と比較した場合、F344 で PAE が 3.4 % 低

第 14 図 F344 入出力特性（熱真空試験）

第 15 図 F344 熱真空試験時温度特性

第 13 図 熱真空試験測定系ブロックダイアグラム

下し、TGI7785-25L において、1.7%低下した。これまでに示した温度試験・熱真空試験時の常温時と比較した場合の PAE の変化を第 4 表にまとめる。第 4 表より、周囲温度の変化に関しては、大気中・真空中いずれにおいても低温側での効率向上、高温側での効率劣化の傾向が共通して見て取れる。また、温度試験と比較した場合、熱真空試験では放電のリスクについてもその確認が可能となるが、今回の測定ではいずれの動作においても、GaAs と比べた際に高電圧で動作させる観点から GaN において懸念される真空動作での放電は見られず、安定した動作が確認された。

次に、第 15 図、第 17 図より、F344、TGI7785-25L いずれも動作開始後、約 1 時間で温度特性が定常化していることが分かる。その間の出力電力や利得、PAE に関しても、大きな劣化は見られない。しかし一方で、低温真空側での温度特性の安定化にはいずれのデバイスも高温真空側よりも時間を要する傾向が見られた。これは、熱真空試験にお

第 16 図 TGI7785-25L 入出力特性（熱真空試験）

第 17 図 TGI7785-25L 熱真空試験時温度特性

第 4 表 温度試験・熱真空試験時の RF 特性まとめ

	F344		TGI7785-25L	
	ΔPAE [%]		ΔPAE [%]	
	Temperature	Thermal vacuum	Temperature	Thermal vacuum
Low	+1.0 %	+6.5 %	+2.2 %	+2.0 %
High	-3.9 %	-3.4 %	-2.4 %	-1.7 %

けるアルミ板の治具への熱伝導のみの排熱能力が、ヒートシンクおよびファンを利用した温度試験における対流や熱伝導を含む排熱能力よりも悪かったことが原因と考えられる。この排熱能力の不足から外部温度が低温状態であっても、ケース温度は上昇を続け、電子移動度が増すことによってドレイン電流値が増加し、結果的に効率が低下し、更に熱が放出されるという悪循環が続いたと考えられる。

以上から今回の評価においては、対流、熱伝導等の熱の伝達方法に関わらず、GaN デバイス自体の動作温度が周囲温度の変化に追従して変化する環境下であれば、GaN デバイスは、真空の影響を受けず、大気中と同等の振る舞いを行うことが示された。したがって、排熱の経路をしっかりと確保することが搭載用を考える場合、非常に重要になると言える。

3.4 放射線試験 放射線試験に関しては、GaN のワイドバンドギャップという特性が、従来の GaAs と比較してもシングルイベントに対して強い耐性を持つことから、 ^{60}Co を用いたトータルドーズの条件を与えている。総照射線量として定めた 320 krad は、現行の衛星プロジェクトにおけるアルミハニカム構造（アルミ厚 0.6 mm）を考慮した

第19図 放射線試験測定結果

8.45 GHz, F344(Vd=24V, Idset=1.0A)

第20図 加速エージング試験測定結果

8.45 GHz, TGI7785-25L(Vd=24V, Idset=1.4A)

第21図 F344 入出力特性 (放射線試験前後)

第22図 TGI7785-25L 入出力特性 (放射線試験前後)

第5表 放射線試験開始時と終了時の各測定データ

	F344				TGI7785-25L			
	PAE	Pout	Pin	Gain	PAE	Pout	Pin	Gain
Radiation start 0:00:00	37.8 %	40.4 dBm	30.7 dBm	9.7 dB	23.1 %	40.2 dBm	30.7 dBm	9.5 dB
Radiation finish 16:00:00	35.3 %	40.0 dBm	30.5 dBm	9.5 dB	21.6 %	39.9 dBm	30.5 dBm	9.4 dB

第18図 放射線試験測定系ブロックダイアグラム

際、バス機器が置かれる環境において、太陽活動等を最悪条件で考えた場合に、深宇宙探査ミッションで約10年、地球周回低軌道衛星で100年以上に相当する照射量である³⁰⁾。これらは、各軌道におけるミッション期間に関する一般的な要求を十分に満足する値である。なお、照射率は、standard rate とし³¹⁾、放射線試験、及び照射後の加速エージング試験の手順等は、ESA (European Space Agency: 欧州宇宙機関) が定める規定に則っている³¹⁾。放射線試験時の測定系ブロックダイアグラムを第18図に示す。ここで、第18図において、照射室内に設置されている試験対象の増幅回路以外は、鉛のブロックで覆うことで放射線の影響を最小限に抑えている。試験は、独立行政法人日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所内の食品照射棟にて実施した。前述の通り、ミッション期間を考慮した放射線試験におい

て、RF出力を連続動作として評価した結果は、これまで報告されていないため、本試験では16時間の放射線試験中、各増幅回路はヒートシンクに固定され、常に飽和出力近辺で連続動作させた。放射線試験後は、加速エージング試験として、100℃の恒温槽で一週間、飽和出力近辺での連続動作を行った。第19図に放射線試験照射中のF344、TGI7785-25Lの入出力特性の時間変化を示す。一方、第20図に加速エージング試験中のF344、TGI7785-25Lの入出力特性の時間変化を示す。最後に、放射線試験前と加速エージング試験後のF344、TGI7785-25L各々の入出力特性の変化を第21図、第22図に示す。はじめに第19図より、F344、TGI7785-25Lいずれも320kradの放射線照射を通して、PAEの劣化が見られ、最終的に放射線照射終了時点で、開始時よりも2.5%、1.5%各々減少した。また、同図より、照射開始直後や照射開始11時間後近辺に、いずれの増幅回路もPAEの劣化が著しい領域が存在する。しかし、ドレイン電流の時間プロットを見ると、F344、TGI7785-25L各々の電流値は320kradの照射で計25mA、22mAの減少を照射開始から一定の傾きで示しているため、F344、TGI7785-25Lの各回路において、これらの時点で極端な劣化が見られた

とは言い難い。ここで、F344, TGI7785-25L 各々の照射開始時と照射終了時の各測定値を第 5 表にまとめる。第 5 表から分かるように、各回路の効率の劣化は、入力電力の低下が最大の要因となっており、共通のドライバーアンプから RF 電力を供給していることや、両回路ともに利得の低下が少ないことから、放射線試験中の特性劣化は、照射室内に設置したドライバーアンプの劣化による影響が最も支配的であると考えられる。

次に、第 20 図より、加速エージング試験では、試験開始から恒温槽の温度が安定するまでの約 4 時間、F344, TGI7785-25L いずれもその特性が劣化しており、PAE で見た場合、加速エージング試験開始時と比較して、4 時間後の時点で各々 5.1 %, 5.7 % 低下した。しかし、恒温槽の安定後は約 164 時間の連続動作中、PAE の変動は、F344 で試験開始時と比較した場合、全て 2.8~5.8 % 低下の範囲に収まり、TGI7785-25L では同様に全て 5.1~5.3 % 低下の範囲に収まる結果となった。したがって、加速エージング試験中の 100 °C での安定動作が確認されたと言える。

最後に、第 21 図、第 22 図より、放射線試験、及び加速エージング試験を終えた F344, TGI7785-25L の入出力特性を放射線試験開始前のものと比べると、F344 では、非線形動作領域における利得の低下に伴い、出力が 0.5 dBm 程度低下している。TGI7785-25L においても、同様に非線形動作領域において、利得の低下が見られ、出力が 0.5~1.0 dBm 低下し、それに伴って、PAE は最大で約 3 % 劣化している。なお、非線形動作領域において、この傾向が大きく見えているのは、放射線試験の影響で、特に飽和領域における利得が低下した結果、非線形動作領域での同じ入力レベルに対する出力レベルの低下が見えていること、並びに GaN は GaAs と比較した際に耐圧や熱伝導率の優位さから、利得が低下してもドレイン電流を増やすことで出力レベルが低下しにくい特徴を持つこと等が、その理由として考えられる。

4. ま と め

本研究では、国産の内部整合型 X 帯民生 GaN デバイス (F344, TGI7785-25L) を用いて、動作条件による RF 特性への影響として、温度試験・熱真空試験・放射線試験を通して宇宙環境耐性の評価を実施した。動作温度変化に関しては、大気中・真空中いずれの評価も実施し、両デバイスにおいて、低温側で 1.0~6.5 % 程度の効率向上、高温側で 1.7~3.9 % 程度の効率劣化が見られた。また、いずれの温度条件においても、真空による放電は確認されなかった。一方、宇宙空間での連続動作を考慮し、これまで実施されてこなかった RF 出力中の放射線試験を実施し、全照射時間における特性データを取得し、放射線試験前後で最大 3 % 程度の効率劣化が確認された。国産の民生 GaN HEMT を用いたこれらのデータはこれまで報告されておらず、アプリケーションの要求に依存する部分は残るものの、民生品であっても十分に宇宙用途としての仕様を満たす可能性を示したと言える。これらによって、宇宙通信で主要な周

波数帯である X 帯通信システムへの GaN HEMT デバイスを用いた高出力・高効率な搭載用 SSPA の実現に向けた大きな知見が得られた。

増幅回路試作に関して、多大なるご支援を頂いたアイ電子株式会社伊東正展氏、山下與慶氏、重田修氏、布村仁志氏にこの場をお借りして、心から感謝の意を述べさせていただきます。また、放射線試験時の施設利用に関してご協力頂きました独立行政法人日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所春山保幸氏、野上大地氏、山縣諒平氏にも深く謝意を示します。最後に、各実験において、協力頂いた JAXA 栗野穰太氏、富木淳史氏、阿部まみ氏、戸田知朗氏に謝意を示し、本論文の謝辞とさせていただきます。

参 考 文 献

- 1) Sanchez, S., Lopez, E., Oster, J., Midan, E., Venditti, P., Sigismondi, R. and Martinez, M.: High Data Rate Multi-mission X-band Transmission Assembly for Earth Observation Satellites, 5th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, Noordwijk, Netherlands, Sep. 2010.
- 2) Mercolino, M., Border, J. S., Madde, R. and Takeuchi, H.: Delta-DOR interoperability and gross-support between ESA, JPL, and JAXA, 5th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, Noordwijk, Netherlands, Sep. 2010.
- 3) Toda, T., Tomiki, A. and Imamura, T.: Phase noise reduction of X-band transponder for radio science of AKATSUKI, 5th ESA International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications, Noordwijk, Netherlands, Sep. 2010.
- 4) Toda, T., Nagae, T., Kamata, Y., Ishii, N. and Nakamura, M.: The newly developed deep space communication instruments for JAXA venus mission, Proceedings of 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, Oct. 2009.
- 5) 小林雄太, 栗野穰太, 野地紘史, 富木淳史, 川崎繁男: GaN を用いた搭載用固体電力増幅器の研究, 第 12 回宇宙科学シンポジウム, 相模原, 日本, 2012 年 1 月。
- 6) 財団法人新機能素子研究開発協会: GaN パワー結晶材料・デバイスに関する技術調査報告書, 2007 年 3 月。
- 7) Maier, D., Alomari, M., Grandjean, N., Carlin, J. F., di Forte-Poisson, M. A., Dua, C., Chuvilin, A., Troadec, D., Gaquiere, C., Kaiser, U., Delage, S. L. and Kohn, E.: Testing the Temperature Limits of GaN-based HEMT Devices, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 10, 4(2010), pp. 427-436.
- 8) Mengistu, E. S.: Large-signal Modeling of GaN HEMTs for Linear Power Amplifier Design, Kassl University press, Hessen, 2007.
- 9) Harris, R. D., Scheick, L. Z., Hoffman, J. P., Thrivikraman, T., Gim, Y. and Miyahira, T.: Radiation Characterization of Commercial GaN Devices, Radiation Effects Data Workshop, Nashville, USA, Mar. 2011.
- 10) Nedelcescu, A. I., Carlone, C., Houdayer, A., von Bardeleben, H. J., Cantin, J. L. and Raymond, S.: Radiation Hardness of Gallium Nitride, IEEE Transactions on Nuclear Science, 49, 6(2002), pp. 2733-2738.
- 11) Hu, X., Karmarkar, A. P., Jun, B., Fleetwood, D. M., Schrimpf, R. D., Geil, R. D., Weller, R. A., White, B. D., Bataiev, M., Brillson, L. J. and Mishra, U. K.: Proton-irradiation Effects on AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors, IEEE Transactions on Nuclear Science, 50, 6(2003), pp. 1791-1796.
- 12) Sellin, P. J. and Vaitkus, J.: New Materials for Radiation Hard Semiconductor Detectors, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., 557(2006) pp. 479-489.
- 13) Aktas, O., Kuliev, A., Kumar, V., Schwindt, R., Toshkov, S., Costescu,

- D., Stubbins, J. and Adesida, I.: ^{60}Co Gamma Radiation Effects on DC, RF, and Pulsed I-V Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs, *Sol. -St. Elect.*, **48**(2004), pp. 471-475.
- 14) Simons, R. N. and Oldham, T. R.: Total Dose Test Report for GaN X-band Amplifier, NASA Electronic Parts and Packaging Program, <https://nepp.nasa.gov/>
 - 15) Lee, Y. S. and Jeong, Y. H.: A High-Efficiency Class-E GaN HEMT Power Amplifier for WCDMA Applications, *IEEE Microwave and Wireless Components Letter*, **17**, 8(2007), pp. 622-624.
 - 16) Schmelzer, D. and Long, S. I.: A GaN HEMT Class F Amplifier at 2 GHz with > 80 % PAE, *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, **42**, 10(2007), pp. 2130-2136.
 - 17) Piotrowicz, S., Ouarch, Z., Chartier, E., Aubry, R., Callet, G., Floriot, D., Jacquet, J. C., Jardel, O., Morvan, E., Reveyrand, T., Sarazin, N. and Delage, S. L.: 43W, 52% PAE X-Band AlGaIn/GaN HEMTs MMIC Amplifiers, *Microwave Symposium Digest*, 2010 IEEE MTT-S International, Anaheim, USA, May 2010.
 - 18) van der Heijden, M. P., Acar, M. and Jvromans, J. S.: A Compact 12-Watt High-efficiency 2.1-2.7 GHz Class-E GaN HEMT Power Amplifier for Base Stations, *Microwave Symposium Digest*, 2009 IEEE MTT-S International, Boston, USA, June 2009.
 - 19) Saad, P., Fager, C., Cao, H., Zirath, H. and Andersson, K.: Design of a Highly Efficient 2-4-GHz Octave Bandwidth GaN-HEMT Power Amplifier, *IEEE Transaction of Microwave and Techniques*, **58**, 7(2010), pp. 1677-1685.
 - 20) Roberg, M., Hoversten, J. and Popovic, Z.: GaN HEMT PA with Over 84% Power Added Efficiency, *IEEE Electronics Letters*, **46**, 23(2010), pp. 1553-1554.
 - 21) Mitani, E., Aojima, M. and Sano, S.: A kW-class AlGaIn/GaN HEMT Pallet Amplifier for S-band High Power Application, *Microwave Integrated Circuit Conference, EuMIC 2007*, Munich, Deutschland, Oct. 2007.
 - 22) Krishnamurthy, K., Martin, J., Landberg, B., Vetury, R. and Poulton, M. J.: Wideband 400 W Pulsed Power GaN HEMT Amplifiers, *Microwave Symposium Digest*, 2008 IEEE MTT-S International, Atlanta, USA, June 2008.
 - 23) Yamashita, Y., Nakada, T., Kumamoto, T., Suzuki, R. and Tanabe, M.: X-Band GaN HEMT Advanced Power Amplifier Unit for Compact Active Phased Array Antennas, *ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, Fukuoka, Japan, Aug. 2009.
 - 24) Shigematsu, H., Inoue, Y., Akasegawa, A., Yamada, M., Masuda, S., Kamada, Y., Yamada, A., Kanamura, M., Ohki, T., Makiyama, K., Okamoto, N., Imanishi, K., Kikkawam, T., Joshin, K. and Hara, N.: C-band 340-W and X-band 100-W GaN Power Amplifiers with Over 50-% PAE, *Microwave Symposium Digest*, 2009 IEEE MTT-S International, Boston, USA, June 2009.
 - 25) Quay, R., van Raay, F., Kuhn, J., Kiefer, R., Waltereit, P., Zorcic, M., Musser, M., Bronner, W., Dammann, M., Eggebert, M. S., Schlechtweg, M., Mikulla, M., Ambacher, O., Thorpe, J., Riepe, K., van Rijs, F., Saad, M., Harm, L. and Rodle, T.: Efficient AlGaIn/GaN HEMT Power Amplifiers, *Microwave Integrated Circuit Conference, EuMIC 2008*, Amsterdam, Netherland, Oct. 2008.
 - 26) Takagi, K., Masuda, K., Kashiwabara, Y., Sakurai, H., Matsushita, K., Takatsuka, S., Kawasaki, H., Takada, Y. and Tsuda, K.: X-band AlGaIn/GaN HEMT with Over 80W Output Power, *Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, CSIC 2006*, San Antonio, USA, Nov. 2006.
 - 27) 高木一考: X帯及びKu帯高出力 GaN HEMT の現状, *電子情報通信学会論文誌 C, エレクトロニクス* **J92-C**, 12(2009), pp. 762-769.
 - 28) Fanning, D. M., Witkowski, L. C., Lee, C., Dumka, D. C., Tserng, H. Q., Saunier, P., Gaiewski, W., Piner, E. L., Linthicum, K. J. and Johnson, J. W.: 25 W X-band GaN on Si MMIC, *CSMANTECH 2005 Conf. Proc.*, New Orleans, USA, Apr. 2005.
 - 29) Lee, J. W. and Webb, K. J.: A Temperature-dependent Nonlinear Analytic Model for AlGaIn-GaN HEMTs on SiC, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **52**, 1(2004), pp. 2-9.
 - 30) The Space Environment Information System (SPENVIS) Web Page: <http://www.spenvis.oma.be/>
 - 31) European Space Components Coordination: Total Dose Steady-state Irradiation Test Method, *ESCC Basic Specification No. 22900*, Mar. 2007.