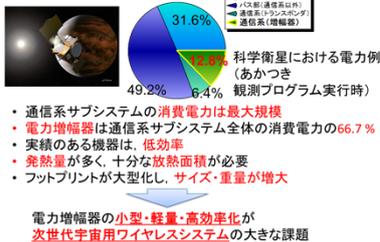


PROCYON搭載X帯SSPAにおける GaNを用いた高効率電力増幅回路モジュール

小林雄太, 吉田賢史 (JAXA), 福田豪, 甲斐誉史朗 (東京理科大学), 野地拓匡 (首都大学東京), 長谷川直輝 (京都大学), 川崎繁男 (JAXA)

研究背景・目的

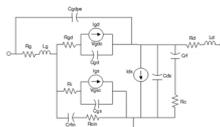
宇宙用ワイヤレスシステムの現状・課題



宇宙機搭載用電力増幅器

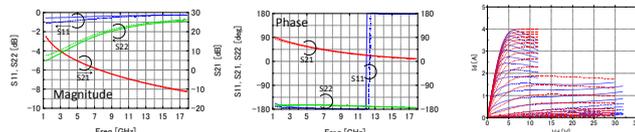
- TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier: 進行波管増幅器)
 - ・ 長所: 高効率
 - ・ 短所: 短寿命, 高電圧動作 (kV), 放電リスク, 真空管利用に伴う脆弱な機械環境耐性, フットプリントの大型化, 軌道上での高電圧部の不具合
 - SSPA (Solid-State Power Amplifier: 固体電力増幅器)
 - ・ 長所: 長寿命, 低電圧動作 (V), 優れた機械環境耐性, 小型化, 高信頼
 - ・ 短所: 低効率
- SSPAの高効率化が課題

非線形モデルの構築



- ・ GaN HEMTデバイスのRF-DC特性に基づき, Angelov GaAs非線形モデルのパラメータ抽出を行い, GaN HEMT非線形モデルを構築

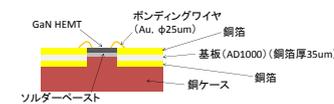
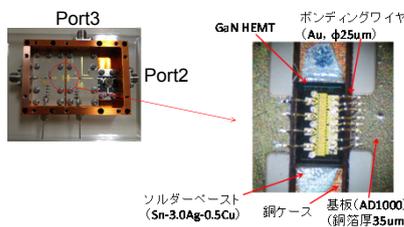
Angelov GaAs非線形モデル



RF特性

DC特性

増幅回路設計・製作・宇宙適用を考慮した実装



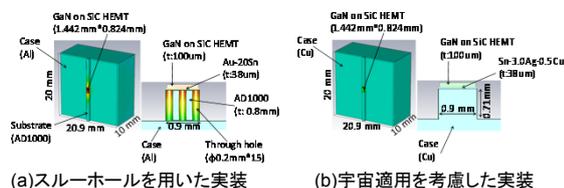
溶剤ペースト

| | | | | | | |
|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|
| Sn-3.0Ag-0.5Cu | > | 金スズ (Au-20Sn) | > | 共晶はんだ (Sn-37Pb) | > | 銀ペースト |
| 64 W/(m ² ·K) | | 57 W/(m ² ·K) | | 54 W/(m ² ·K) | | 25 W/(m ² ·K) |

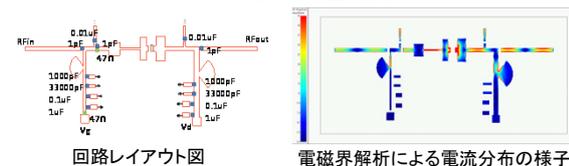
底面ケース

| | | | | |
|---------------------------|---|------------------------------|---|---------------------------|
| 銅 | > | 銅モリブデン (CuMo) | > | アルミ |
| 400 W/(m ² ·K) | | 182~280W/(m ² ·K) | | 218 W/(m ² ·K) |

- ・ 凸型加工銅ケースへの直接実装による高熱伝導率な構成によって優れた放熱特性を実現
- ・ 凸型の加工により金属同士の接触面が無くなり, 振動環境・真空環境でも放熱特性に影響は無い

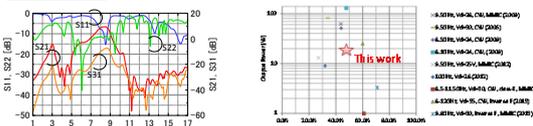


熱解析による放熱特性の比較

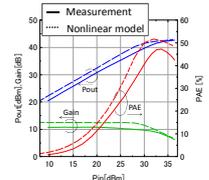


増幅回路評価

基本RF特性



小信号特性

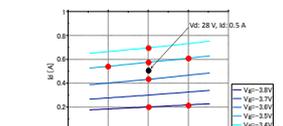


設計値と実測値の比較

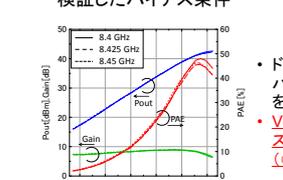
| | | |
|---------|----------|----------|
| | 8.4 GHz | |
| Pmax | 42.6 dBm | 42.9 dBm |
| PAE Max | 47.3 % | 51.7 % |

最大出力 42.6 dBm
最大PAE 47.3 %
@8.4 GHzを実現

バイアス条件によるRF特性の改善



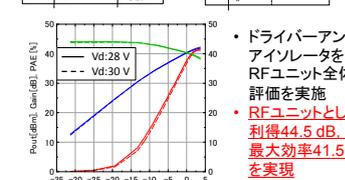
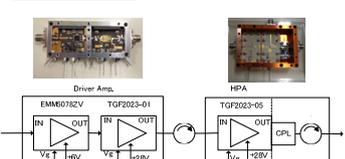
検証したバイアス条件



Vd 30 V, Vg -3.8 Vでの入出力特性

- ・ ドレイン電圧, ゲート電圧のバイアス条件を変更し, 特性を評価
- ・ Vd 30 V, Vg -3.8 Vのバイアス条件で, 最大PAE48.0 % (@8.4GHz)を実現

RFユニット評価



- ・ ドライバーアンプ・アイソレータを含むRFユニット全体の評価を実施
- ・ RFユニットとして, 利得44.5 dB, 最大効率41.5 %を実現

SSPA EM評価



SSPA EM外観

基本性能

| | | |
|------------|-----------|------------|
| 測定項目 | 測定値 | 備考 |
| 出力レベル High | +41.8 dBm | Ch. 35 |
| 出力レベル Low | +30.5 dBm | Ch. 35 |
| スプリアス | -70.1 dBc | Fc+70.5kHz |
| 高調波 | -29.0 dBc | 3次 |
| 質量 | 1470g | |
| 総合効率 | 32.3 % | High時 |
| 消費電力 | 46.8W | 電源電圧+36V |



環境試験結果

| | | | |
|--------------------------|------------|-----------------------|----------------------|
| | Pout [dBm] | Power consumption [W] | Total efficiency [%] |
| After thermal vacuum | 41.7 | 45.4 | 32.6 |
| After vibration (Sine) | 41.8 | 46.1 | 32.6 |
| After vibration (random) | 41.8 | 44.6 | 33.8 |
| After shock acceleration | 41.7 | 43.9 | 33.4 |
| After radiation | 41.8 | 46.1 | 32.5 |

- ・ EMの環境試験を通して, 特性の劣化は見られず, 宇宙環境耐性を確認

X帯SSPA実績機器との比較

| Spacecraft Name | Agency | PA type | RF output power [W] | Size [mm] | Weight [kg] | Power consumption [W] | Total efficiency [%] |
|---------------------|--------|-----------|---------------------|-------------|-------------|-----------------------|----------------------|
| HAYA BUSA | JAXA | GaAs SSPA | 20 | 310*185*35 | 1.45 | 92.7 | 21.6 |
| PLANET-C | JAXA | GaAs SSPA | 10 | 271*150*80 | 1.9 | 44.5 | 22.5 |
| GOSAT ALOS-2 | JAXA | GaAs SSPA | 20 | 313*147*142 | 2.05 | 98 | 20.4 |
| SPT, HELIOS, SKYNET | ESA | GaAs SSPA | 22 | 220*140*84 | 1.5 | 90 | 24.4 |
| SPT-5 | ESA | GaAs SSPA | 22 | 271*160*70 | 1.5 | 91 | 24.2 |
| MER | NASA | GaAs SSPA | 17 | 174*134*47 | 1.37 | 66 | 25.8 |
| PROCYON | JAXA | GaN SSPA | 15 | 150*120*62 | 1.47 | 46.8 | 32.3 |

世界最高性能のSSPAを実現

- ・ GaN HEMTを用いたX帯SSPAの世界初となる宇宙実証をPROCYONプロジェクトにおいて行う予定である
- ・ 本成果は今後の超小型深宇宙探査におけるバス機器の役割を担い, 更には大型衛星へと発展していくと見られる

