

固体化増幅器用電力FETの開発状況

(株)東芝 マイクロ波技術部

石村 浩

2007年 8月 31日

Copyright 2007, Toshiba Corporation. 電波航法研究会第二回研究会資料

概要

1. 高出力化のために
 - ・何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と今後の課題
 - ・C帯、X帯、(Ku帯)での出力
 - ・現在の信頼性は?
 - ・各社の開発状況
 - ・今後の課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
 - ・レーダへの適用

概要

1. 高出力化のために
 - ・何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と今後の課題
 - ・C帯、X帯、(Ku帯)での出力
 - ・現在の信頼性は?
 - ・各社の開発状況
 - ・今後の課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
 - ・レーダへの適用

何故高出力化なのかー通信機器用途ー

●大容量デジタルデータ通信の要求

→ 低歪化(歪効率向上)の要求に加え

携帯基地局

- ・チャネル数増大
- ・データ容量増大
- ・通信距離拡大の要請

衛星地球局

- ・データ容量増大
- ・SSPA化の加速

電力FET高出力化の要求

何故高出力化なのか—レーダ用途—

20070816-1

特長

高出力化

探知距離延伸、小目標探知、ECM等

用途

ミサイル防衛レーダ



HPM(High Power Mirowave)レーダ



航法気象レーダ

搭載用レーダ

FCSレーダ

シーカ 等

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

4

マイクロ波増幅素子としてGaAs

20070816-1

GaAs の特長

高速動作: 電子移動速度がシリコンに比べ格段に速い

→マイクロ波帯増幅素子の代表として30年以上の実績

受発光機能: シリコンに比べて可視光～赤外光の領域を発光

→OEIC

脆い: シリコンに比べて割れやすく、大型化が難しい

高価: シリコンに比べてコストが高い



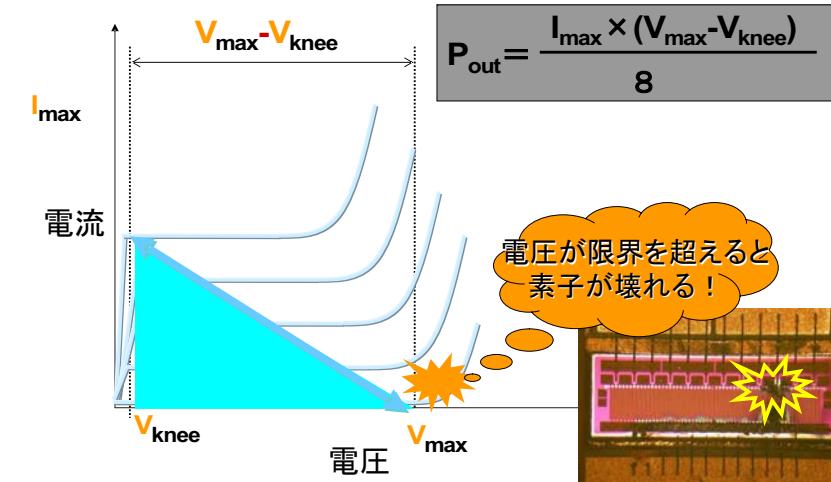
ほぼGaAsがもつ材料としての出力限界に近い
ところまで製品化が進んだ

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

5

GaAsの限界

20070816-1



TOSHIBA
Leading Innovation >>> .

6

GaAsに代わる半導体材料は無いか？

20070816-1

半導体

・単元素... Si, Ge

・化合物

II-VI... ZnSe, ZnS, CdS

III-V... GaAs, GaP, GaN

IV-IV... SiC, SiGe

	II	III	IV	V	VI
2		B	C	N	O
3		Al	Si	P	S
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
6	Hg	Tl	Pb	Bi	Po

TOSHIBA
Leading Innovation >>> .

7

各種半導体の物性定数と性能指標

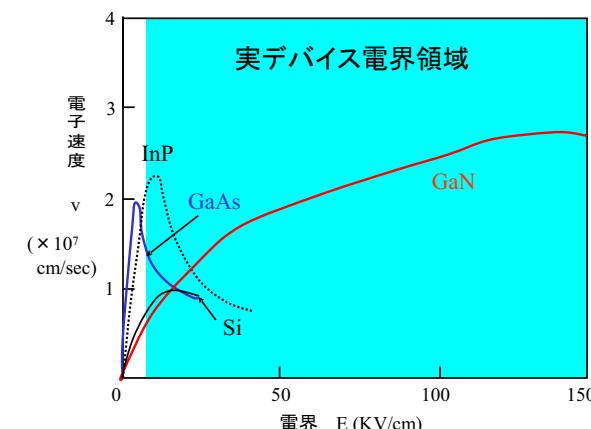
材料	GaN	4H-SiC	6H-SiC	GaAs	Si
格子定数(Å)	a 3.189 c 5.185	a 3.073 c 10.053	a 3.08 c 15.12	5.6533	5.4301
禁制帯幅(eV)	3.39	3.26	3	1.43	1.12
電子移動度 μ	900 2DEG 2000	↑ 850 // 1020	↓ 400 // 80	8500	1400
正孔移動度	150	115	90	400	600
破壊電界 E_b	3.3E+06	2.2E+06	2.5E+06	4.E+05	3.E+05
熱伝導度 λ (W/cmK)	1.3~2	4.9	4.9	0.5	1.5
飽和速度 v_{sat}	2~2.7E+07	2.2E+07	1.9E+07	1.3E+07	1.0E+07
誘電率 ϵ	9	9.7	10	12.8	11.8
バルク成長	$\times \rightarrow \Delta$	$\Delta \rightarrow O$	$\Delta \rightarrow O$	\odot	\odot
エビ成長	$\Delta \rightarrow O$ SAP,SiC, Si	$\Delta \rightarrow O$	$\Delta \rightarrow O$	\odot	\odot
BM(対Si)	653	340	191	16	1
BHFM(対Si)	78	50	25	11	1
デバイスターイット	青色光素子 高周波素子 パワー素子	パワー素子	パワー素子	高周波素子	半導体産業 の中心

BM : バリガーパー性能指數(低周波) = $\epsilon \mu E_b^3$
BHFM : バリガーパー性能指數(高周波) = μE_b^2

サファイア : $\lambda = 0.42$
 $a=4.76, c=12.99$

マイクロ波半導体材料の電子速度・電界特性の比較

GaNは実用域の電子速度が速い！



GaAsに替わるマイクロ波半導体材料

その材料特性から、高出力化へのポテンシャルが注目されているワイドバンドギャップ(WBG)半導体
バンドギャップ(禁制帯幅)が2eV~6eVの半導体

(一般的な特徴)

- 化学結合(原子間結合力)が強く、材質が硬い
- 機械的、化学的に安定ではあるが、加工が難しい

(次世代素子として期待されている特長)

- 高温安定動作
- 多くのIII-V族、II-VI族化合物が直接遷移型半導体で「光る」
- 環境調和材料が多い

(有望視されている材料例)

GaN、SiC、C(ダイヤモンド)、AlN、ZnO 等

GaNはさらに右の利点有利

・HEMT構造ができる
・加工性が良い(GaAsとほぼ同じプロセスが使える)

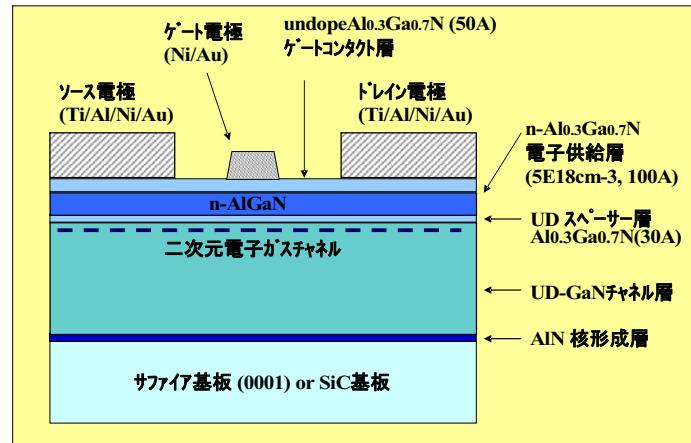
GaN材料の特長

- 高い飽和速度
(GaAsの1.35倍)
- 大きな絶縁破壊電界
(GaAsの約10倍)
- ヘテロ構造が可能
- 大きなバンドギャップ
(GaAsの2.4倍)
- 高い熱伝導率
(GaAsの2.6倍)
- 低い誘電率
(GaAsの約3/4倍)
- 安全で豊富な材料
- 原子間結合力大
- 直接バンドギャップ
- 高速・高周波数動作
- 低オン抵抗
- 高出力・高耐圧
- 高温安定動作
- 環境調和(Asフリー)
- 機械的・化学的安性
- 光る(LED、LD)

GaN系HEMT 構造模式図

20070816-1

GaNはHEMT構造ができる

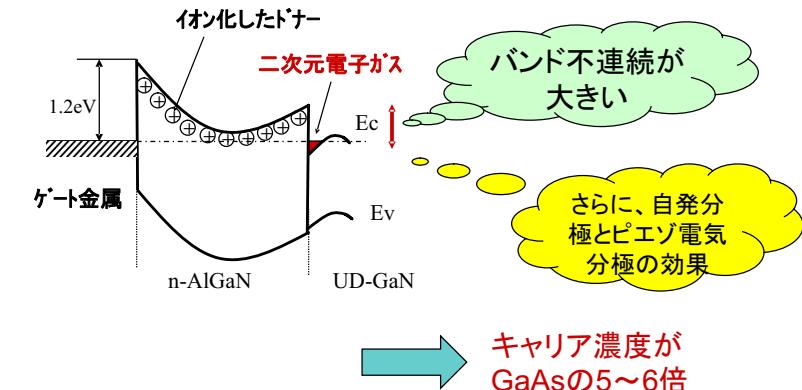


TOSHIBA
Leading Innovation >>>

12

GaN(-HEMT)の“特長”

GaN HEMTは電流をたくさん流せる—2

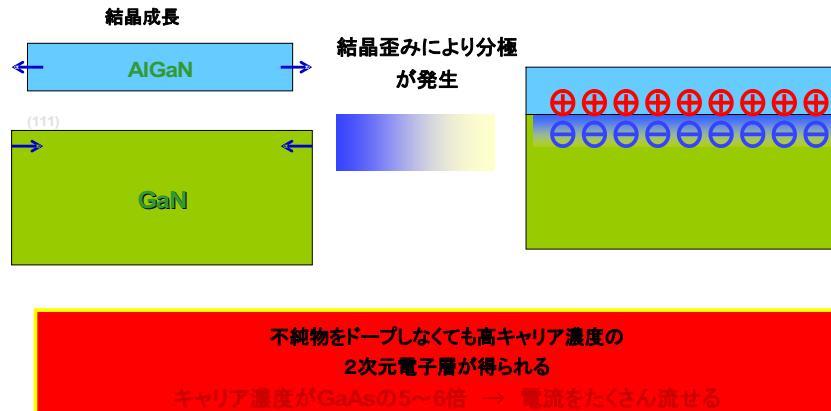


14

GaN半導体の特長

20070816-1

ヘテロ接合 GaN HEMTは電流をたくさん流せる—1



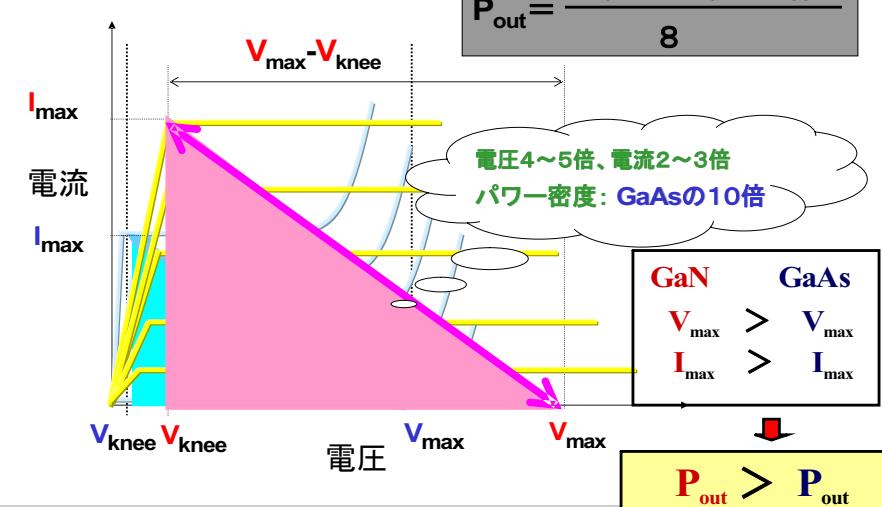
TOSHIBA
Leading Innovation >>>

13

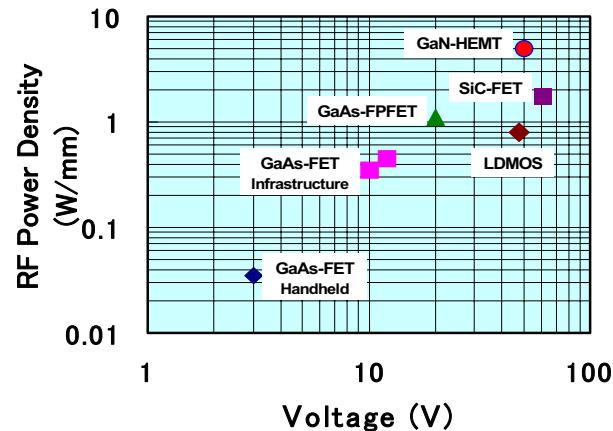
GaNでは電圧、電流とも大きくとれる

20070816-1

$$P_{out} = \frac{I_{max} \times (V_{max} - V_{knee})}{8}$$



15



GaN素子の特長:まとめ

特長

- ・バンドギャップ大…高耐圧
- ・ピエゾ効果…高電子密度 → 高出力化が可能
- ・電子の飽和速度大…高速, 高周波動作
- ・高い熱伝導度(GaAsの2.6倍)…高出力化が可能
- ・原子間結合力大…機械的、化学的に安定



- ・高周波高出力パワーアンプ
L帯からミリ波まで
- ・高温, 放射線…耐環境素子
- ・低損失パワーデバイス

概要

1. 高出力化のために
 - ・何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と課題
 - ・C帯、X帯、(Ku帯)での出力
 - ・信頼性は?
 - ・各社の開発状況
 - ・課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
 - ・レーダ

C帯におけるGaN半導体デバイス報告例 (1)

Y. Okamoto, et al.
2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.

NEC

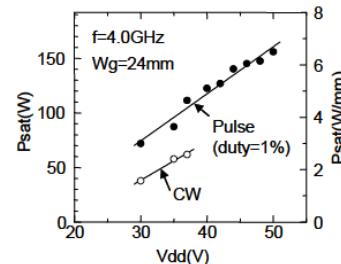


Fig.4 Pulsed and CW output power as a function of operation voltages for 24-mm-wide GaN FET.

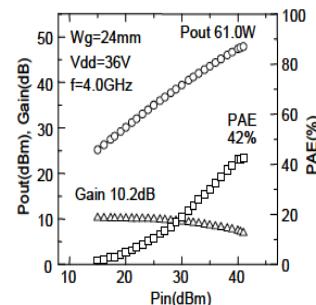
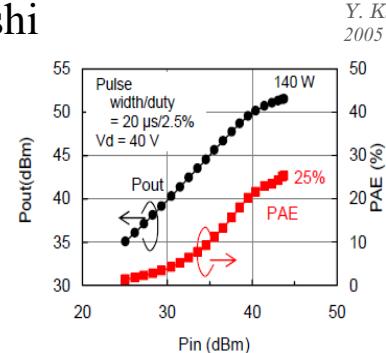


Fig.8 Output power, linear gain and power-added efficiency for 24-mm GaN-FET power amplifier as a function of input power.

@ 4GHz Pulsed output power 150W @ Vd=50V
Breakdown Voltage >200V @ 1mA/mm

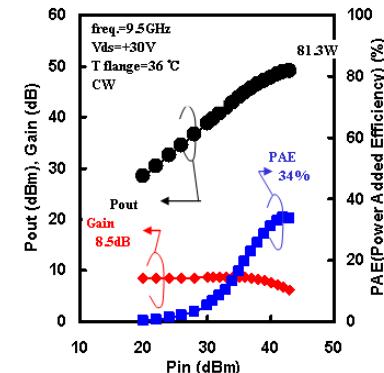
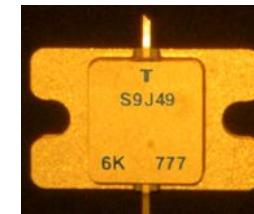
C帯におけるGaN半導体デバイス報告例(2)

Mitsubishi

Y. Kamo, et al.
2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.Fig.8 Output power and power-added efficiency for 50.4 mm wide gate AlGaN/GaN HEMT with SiN film by Cat-CVD with the NH₃ treatment.@ 5GHz Pulsed output power 140W @ Vd=40V
Breakdown Voltage 160V @ 1mA/mmTOSHIBA
Leading Innovation >>

当社における開発例:X帯50W級電力FET (GaN)

◆X帯50W級電力FET (GaN)



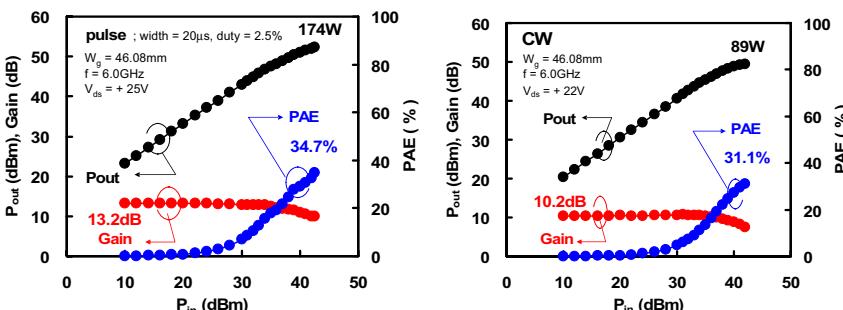
X帯50W級電力FET (GaN)のパッケージ

* パッケージサイズ(最外周寸法):
21.5mm × 12.9mm

当社における評価結果

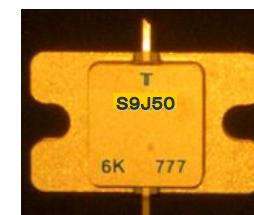
@ 9.5GHz CW output power 81. 3W @ Vd=30V
Breakdown Voltage >150V @ 1mA/mmTOSHIBA
Leading Innovation >>

当社における開発例 @6GHz

@ 6GHz Pulsed output power 174W @ Vd=25V
Breakdown Voltage >150V @ 1mA/mmTOSHIBA
Leading Innovation >>

当社における開発例:Ku帯電力FET (GaN)

Ku帯50W級電力FET (GaN)

近日中にKu帯50W超素
子の結果を発表します

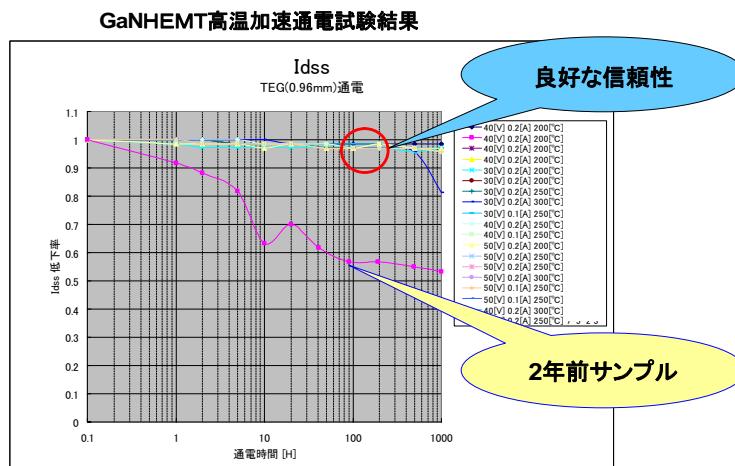
Ku帯50W級電力FET (GaN)のパッケージ

* パッケージサイズ(最外周寸法):
21.5mm × 12.9mmTOSHIBA
Leading Innovation >>

概要

1. 高出力化のために
 - ・何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と今後の課題
 - ・C帯、X帯、(Ku帯)での出力
 - ・現在の信頼性は？
 - ・各社の開発状況
 - ・今後の課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
 - ・レーダへの適用

十分製品化できるレベルになった



概要

1. 高出力化のために
 - ・何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と今後の課題
 - ・C帯、X帯、(Ku帯)での出力
 - ・現在の信頼性は？
 - ・各社の開発状況
 - ・今後の課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
 - ・レーダへの適用

米国におけるGaN素子開発、実用化への動き

- DARPA主導 X帯フェーストアーレアンテナ用固体増幅器
- 1998 ・Nitres社設立(UCSB) GaN系PA開発・製造
 - 2000 ・Cree社(SiCトップメーカー) Nitres社を買収
 - ・Cree Lighting社 GaN系PAサンプル出荷発表
 - ・Nitronex社設立 (North Carolina State Univ.)
 - ・RF-Nitro社設立 (Hughes Electronics and Cornell Univ.)
 - 2001 ・Nitronex社 GaN on Si 系PAサンプル出荷発表
 - ・RF-Nitro社 GaN系PAサンプル出荷発表
 - ・RF Micro Devices(TRWの子会社 GaAs HBT for CDMA)
 - RF-Nitro買収(2001末)
 - 2002～ DARPA主導で新たなプログラム
 - WBG Technology Initiative
 - ⇒Microsystem Integration
 - 2003～2004
 - ・TriQuint社 はじめ化合物半導体企業、GaN系Power Amp.素子試作結果
 - ・Cree社 ATMI社買収(2003末)
 - 2005～2007
 - ・Nitronix社／Cree社／RF Micro Device社／RFHIC社(韓国)等がL帯、S帯のサンプル

歐州**EUからのファンド**

- BRITE-EURAMプログラム・MIGHT-Project,
- ESPRITプログラム 等

民間企業

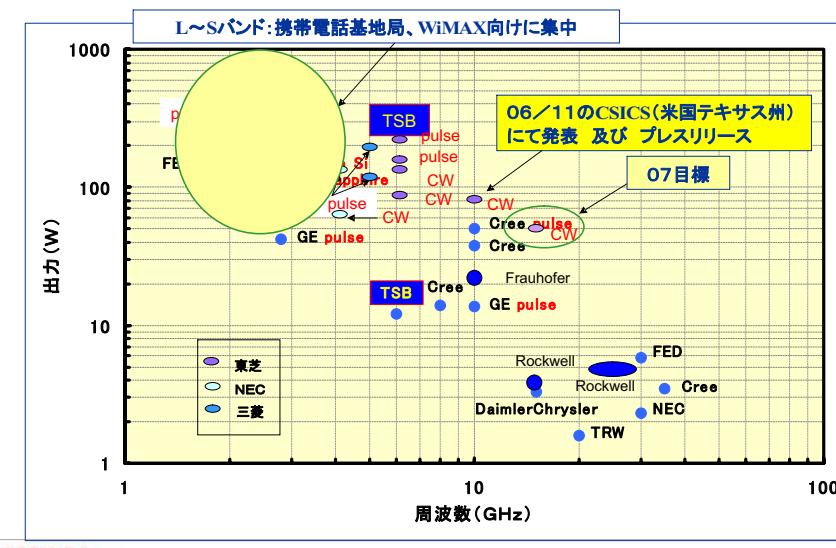
Marconi, Thomas Swan, Thomson CSF,
CNRS, Infineon, Daimler-Chrysler,

Picogiga International, ...

大学 研究機関

Nottingham 大学(英国),
Ghent 大学(ベルギー), IMEC(ベルギー),
Ulm大学, Fraunhofer Institute(独) ...

欧州からは学会での発表が主であるが、Ka帯までのデバイス試作例も公表



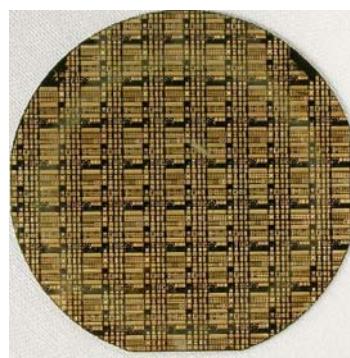
- NECが先行着手 1998年
GaAsデバイス研究開発のインフラを利用
- 松下電子, 沖電気, 富士通, 古河電工, NTT
- SONYなどが着手
- NEDO 地域コンソーシアム
- 新しい国プロの動き(2002年～)
素子協(立命館大学、NEC、産総研 他)…高周波パワー素子開発 2002年～2007年
サンケン電気 … 電源用パワーデバイス開発
他、総務省系、経産省系PJあり
- 三菱電機、日本電気:学会、プレス等でS帯、C帯電力FETを発表 2005年～2006年
- EudynaがS帯でサンプル出荷開始 2005年
- 東芝 C帯で174W出力達成(一時世界最高出力—プレスリリース) 2005年
- 東芝 X帯で81.3W出力達成(一時世界最高出力—プレスリリース) 2006年
- 東芝 X帯でサンプル出荷開始 2006年
- 沖電気 L/S帯FETの上市計画発表 2007年

概要

1. 高出力化のために
•何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と今後の課題
•C帯、X帯、(Ku帯)での出力
•現在の信頼性は?
•各社の開発状況
•今後の課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
•レーダへの適用

- ・GaN自立基板／格子整合基板がない
GaとNの蒸気圧差が大、高温成長が必要
→ 高品質なエピタキシャル成長(結晶成長)が難しい
- ・化学的、機械的に安定で酸・アルカリにほとんど溶けない
→ デバイス作成が難しい
- ・電流コラプス現象(高電圧印加でドレイン電流が減少)
→ DC特性から予想される出力が得られない
- ・高出力密度 = 熱密度が高い
インピーダンスが大きく異なる
→ 熱設計、回路設計に工夫が必要

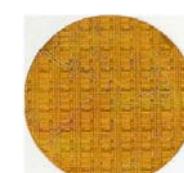
AlGaN/GaN HEMT 試作例



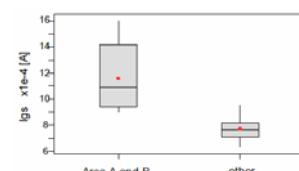
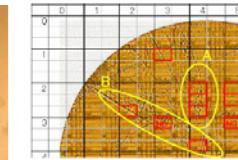
3インチSiC基板

基板結晶品質が重要！

Evaluation of Substrate Quality

Surface morphology of epi HEMTs on 2 inch epitaxial wafer image
1 cm

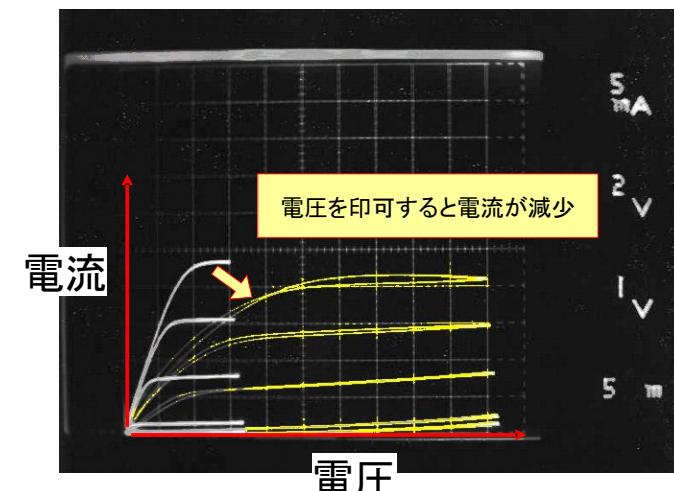
Superimposed fabricated device

Microscope Image of concentrated defect area
100μmDefects concentrated area A and B
Gate leakage current devices are shown in square.

Presented by
K. Matsushita, et al. (Toshiba Corp)
at
COMPOUND SEMICONDUCTOR MANTECH
2005 International Conference on Compound Semiconductor MANufacturing TEChnology
New Orleans, Louisiana, U.S.A.
April 11-14, 2005

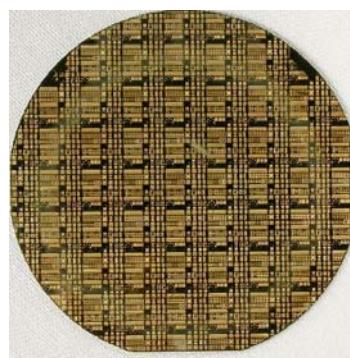
Improving an epitaxial layer quality
is critically important to realize target devices

まだ完全には解決していない課題一電流コラプス



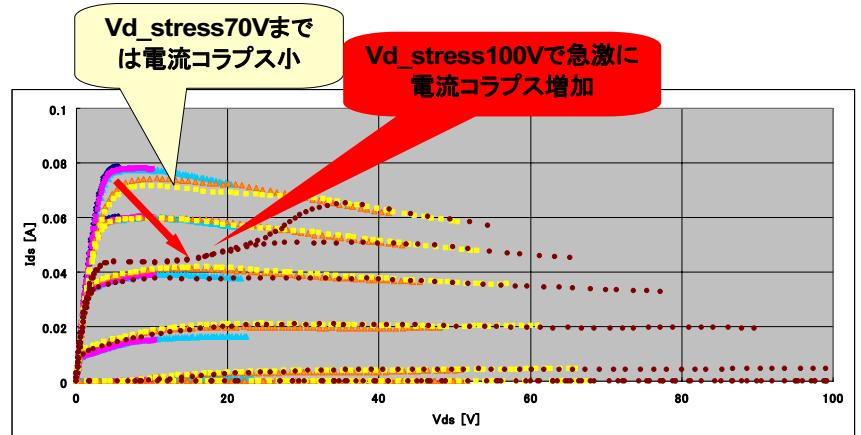
- ・GaN自立基板／格子整合基板がない
GaとNの蒸気圧差が大、高温成長が必要
→ 高品質なエピタキシャル成長(結晶成長)が難しい
- ・化学的、機械的に安定で酸・アルカリにほとんど溶けない
→ デバイス作成が難しい
- ・電流コラプス現象(高電圧印加でドレイン電流が減少)
→ DC特性から予想される出力が得られない
- ・高出力密度 = 热密度が高い
インピーダンスが大きく異なる
→ 热設計、回路設計に工夫が必要

AlGaN/GaN HEMT 試作例



3インチSiC基板

電流コラプスー低電圧域では改善されてきたが…

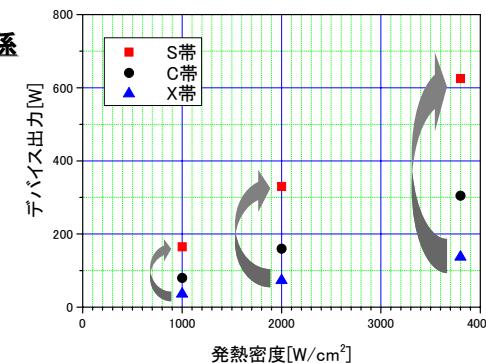


TOSHIBA
Leading Innovation >>>

36

今後顕在化しそうな課題－熱設計2－

発熱密度と 素子出力の関係

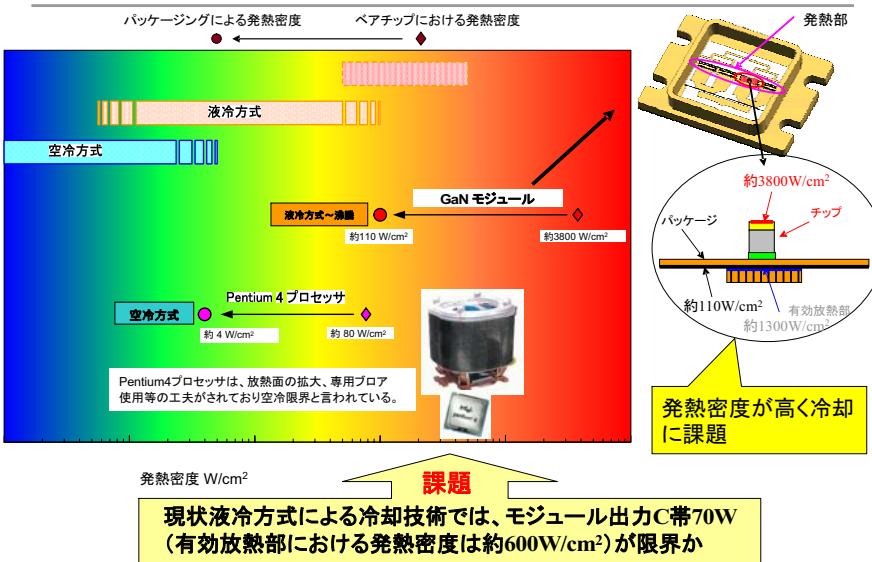


- 高出力であるGaNは発熱密度が高く、装置での冷却が課題である。そのため、チップ効率の向上及び冷却能力の向上が必要である。
- 発熱密度について
冷却能力が同等である場合、S帯の出力はX帯の約4~5倍程度が冷却能力による限界か。

TOSHIBA
Leading Innovation >>> .

38

今後顕在化しそうな課題－熱設計1－



TOSHIBA
Leading Innovation >>> .

37

20070816-1

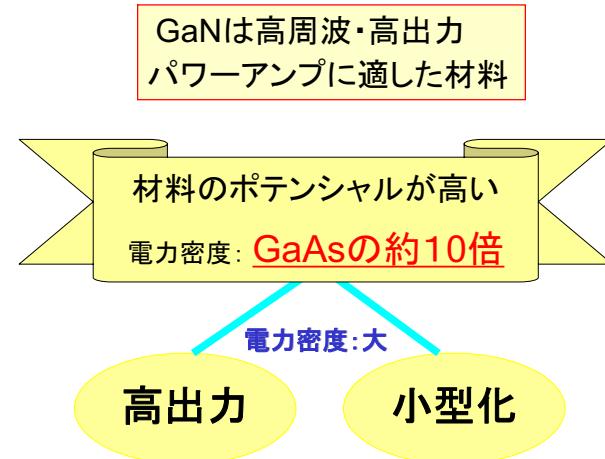
概要

1. 高出力化のために
 - ・何故GaNなのか(GaAs vs GaN)
2. 現状と今後の課題
 - ・C帯、X帯、(Ku帯)での出力
 - ・現在の信頼性は？
 - ・各社の開発状況
 - ・今後の課題等
3. 固体化増幅器等への応用例
 - ・レーダへの適用

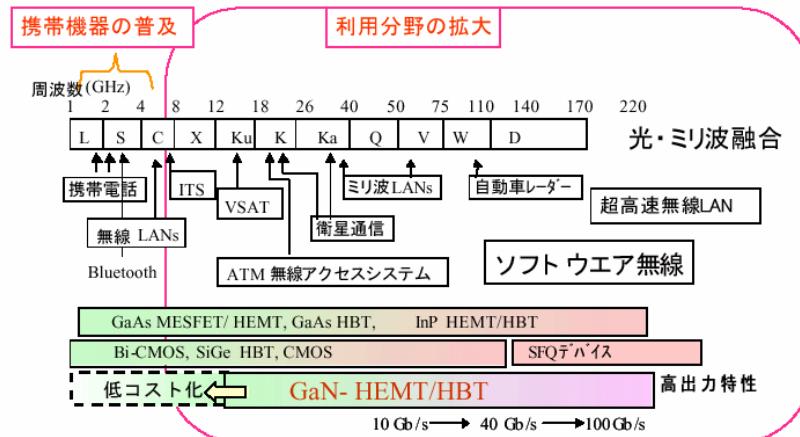
TOSHIBA
Leading Innovation >>> .

39

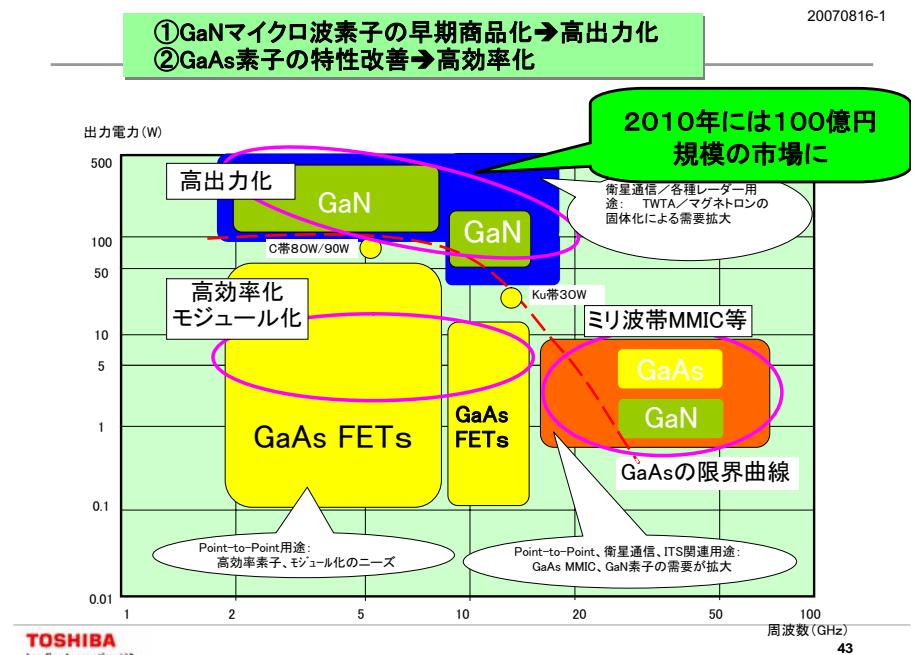
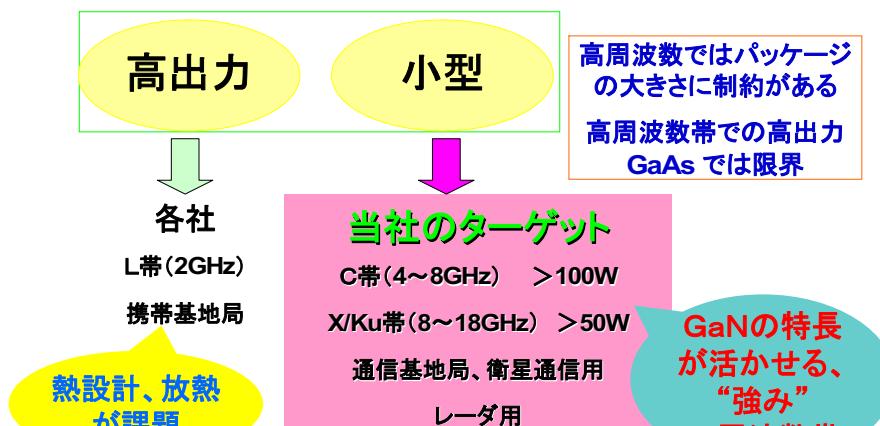
GaNなら高出力で小型化が可能



各種無線システムとGaN素子利用分野



GaNの特徴 - 左記を活かすために - 当社の考え方

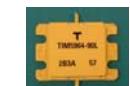


東芝の高出力FET開発実績及び開発計画

- L~S帯 : 150W級電力FET
 - 400W級電力FET 2007年度リリース予定
 - 500W級電力FET(GaN) 2009年度リリース予定



- C帯 : 90W級電力FET(*)
 - 150W級電力FET(GaN) 2008年度リリース予定



- X~Ku帯: 30W級電力FET(*)
 - 50W級電力FET(GaN)(X帯) 2007年度リリース(注)
 - 50W級電力FET(GaN)(Ku帯) 2007年度リリース予定



- MMIC : X帯6W級MMIC



(注) 2006年11月「X帯80W級GaN FET」学会(米国)発表

* : 業界最高出力
(2007.6.21現在)

レーダへの適用例

1. C帯固体化気象レーダ: GaAs 90WFET
2. X帯固体化気象レーダ: GaN 50WFET
3. 搭載用航法気象レーダ: GaN 50WFET(適用予定)

レーダ送信機の固体化

- 電子管(マグネットロン、クライストロン等)を用いた送信機においては、部品枯渇、信頼性の問題から、半導体素子に置き換える固体化が進んでいる。マイクロ波帯のレーダでは、高出力半導体素子の開発が進んでいる低周波数帯(~4GHz)では固体化が進んでいるが、高周波数帯(4GHz~)では半導体素子の高出力化が難しかったため、実用例が少ない。

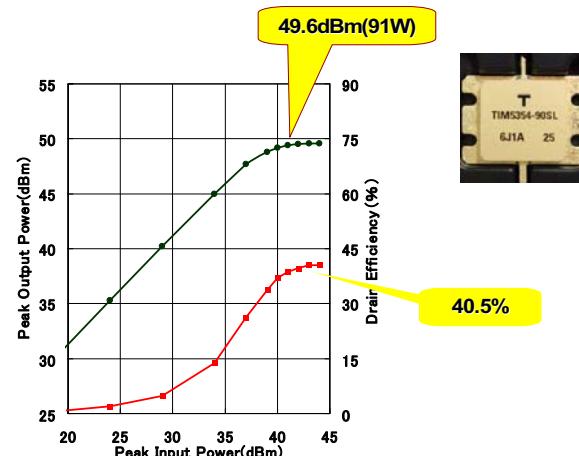


レーダへの適用例

1. C帯固体化気象レーダ: GaAs 90WFET
2. X帯固体化気象レーダ: GaN 50WFET
3. 搭載用航法気象レーダ: GaN 50WFET(適用予定)

90W GaAs FET

20070816-1



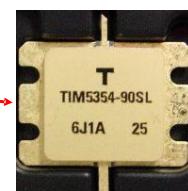
Input/Output characteristics of the
90W FET

C-Band 500W Solid-State Power Amplifier (SSPA) for New Weather Radar

20070816-1



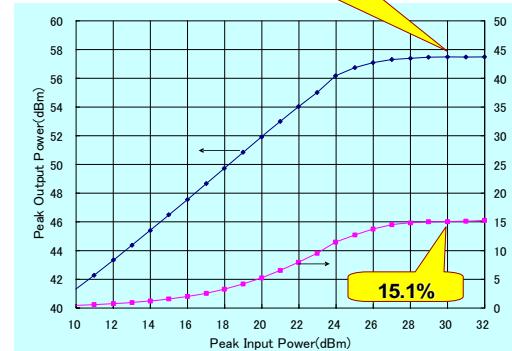
C-Band 500W SSPA



90W GaAs FET

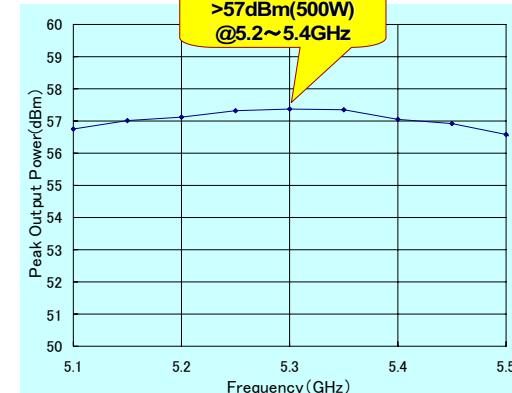
→64pcs in final stage
for 3.5kW Transmitter

57.49dBm(561W)

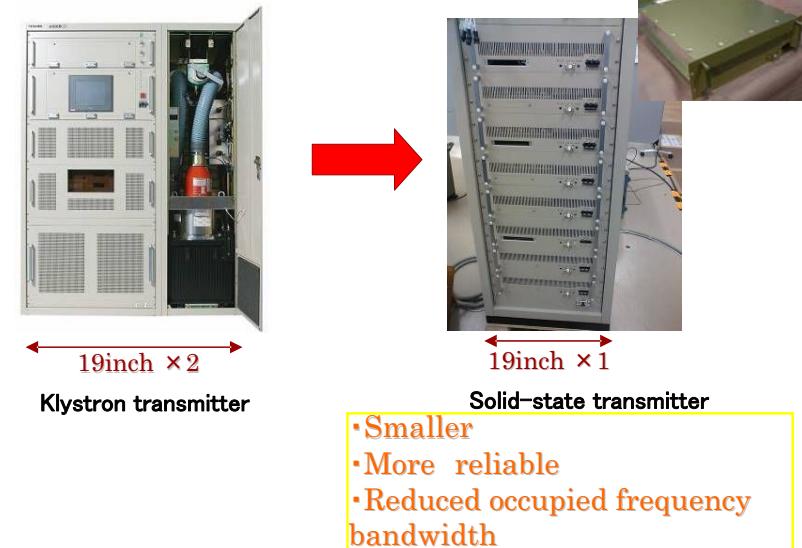


Output Power and Total Efficiency of the SSPA at 5.35GHz

>57dBm(500W)
@5.2~5.4GHz



Output Bandwidth of the SSPA



レーダへの適用例

1. C帯固体化気象レーダ: GaAs 90WFET
2. X帯固体化気象レーダ: GaN 50WFET
3. 搭載用航法気象レーダ: GaN 50WFET(適用予定)

GaN X帯50WFET(TGI8596-50)

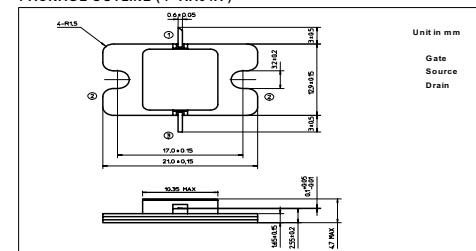
FEATURES

- HIGH POWER
Pout=47.0dBm at Pin=41.0dBm
- HIGH GAIN
GL=9.0dB at 8.5GHz to 9.6GHz
- BROAD BAND INTERNALLY MATCHED HEMT
HERMETICALLY SEALED PACKAGE

RF PERFORMANCE SPECIFICATIONS (Ta= 25°C)

CHARACTERISTICS	SYMBOL	CONDITIONS	UNIT	MIN.	TYP.	MAX.
Output Power at Pin=41dBm	Pout		dBm	46.0	47.0	—
Liner Gain	GL	VDS= 24V f = 8.5 to 9.6GHz	dB	8.0	9.0	—
Drain Current	IDS1	A	—	4.5	TBD	—
Gain Flatness	ΔG	dB	—	—	±0.8	—
Power Added Efficiency	ηadd	%	—	35	—	—
Channel Temperature Rise	ΔTch	(VDS x IDS + Pin - Pout) x Rth(j-c)	°C	—	110	—

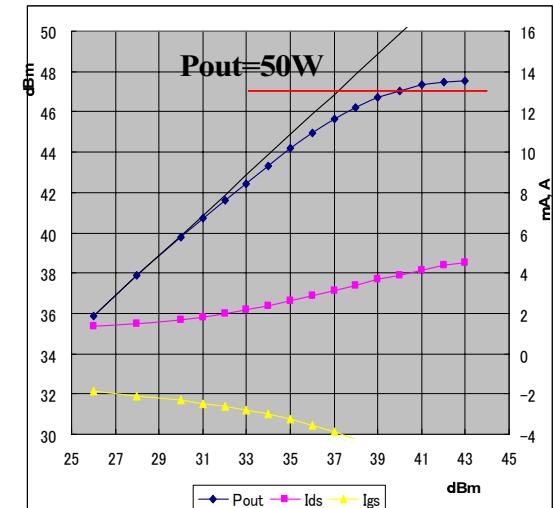
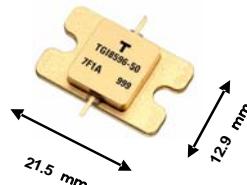
PACKAGE OUTLINE (7-AA04A)



HANDLING PRECAUTIONS FOR PACKAGE MODEL

Soldering iron should be grounded and the operating time should not exceed 10 seconds at 260°C.

GaN X帯50WFET特性例



X帯送信機用250W級GaN送受信機の例

気象レーダ(11月納入予定)にて製品化

GaNモジュールの諸元表

周波数	X帯(帯域500MHz)
出力電力	250Wピーク
利得	25dB
電源電圧	+35V/-5V
寸法(製品時)	150mm×150mm×45mm



GaN送受信機の諸元表

周波数	X帯(帯域500MHz)
出力電力	166W以上
NF	5dB以下
電源電圧	DC48V
寸法(製品時)	214mm×450mm×153mm

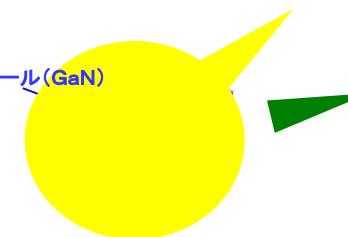
レーダへの適用例

1. C帯固体化気象レーダ: GaAs 90WFET
2. X帯固体化気象レーダ: GaN 50WFET
3. 搭載用航法気象レーダ: GaN 50WFET(適用予定)

防衛省向け航空機搭載用気象レーダの固体化－予定－

- ・ 現在、防衛省向けとして使用されている航空機搭載用気象レーダは、送信管としてマグネットロンを用いており、部品枯渇、信頼性の問題を抱えているため、送信機の固体化を提案している。
- ・ マグネットロンをGaN半導体を用いた固体化送信モジュールに置き換えることにより、信頼性、維持整備性を改善するとともに、電波法改正後の新スプリアス規制への対応も可能とする。
- ・ 半導体素子として従来のGaAsではなくGaNを使用することで、送信電力を増加することができる。また、この固体化はマリンレーダ等小型の高周波数帯レーダにも適用可能である。

固体化送信モジュール(GaN)



送受信機(固体化)

「固体化増幅器用電力FETの開発状況」

－電波航法研究会第二回研究会資料－

初版 平成19年8月31日

株式会社 東芝 社会ネットワークインフラ社
小向工場 マイクロ波技術部
〒212-8581 川崎市幸区小向東芝町1
TEL 044-548-5145 FAX 044-548-5955