

GaN-HEMTを使用したW-CDMA基地局用 高出力増幅器

High-Power GaN-HEMT Amplifiers for W-CDMA Wireless Base-Station Applications

あらまし

第3世代基地局はまもなく高速伝送レート化され、2010年以降には第4世代システムの商用化が始まると予想されている。今後の大容量基地局では、基地局装置のうち、とくに送信電力増幅器の低消費電力化と小型化が求められている。富士通は、この課題を解決するため、高電圧動作可能な第3世代基地局向け窒化ガリウム高電子移動度トランジスタ（GaN-HEMT）を開発した。そしてGaN-HEMTを使用した高出力増幅器とひずみ補償回路と組み合わせることにより第3世代通信規格仕様を満たし、かつ高電力効率動作することに成功した。また、GaN-HEMTの量産に向けて、大口径基板上のデバイス試作のほか、低コスト化を念頭に安価な導電性基板を使用した試作も行い、基地局用途として十分な特性を得ることに成功した。さらに初期信頼度についての評価を行いGaN増幅器が実用レベルに近いことを確認した。本稿では、これらの開発状況について述べる。

Abstract

The third generation of mobile communication systems is predicted to soon achieve higher transmission rates, and the fourth generation of such systems is expected to be commercialized by around 2010. For up-coming high-capacity base stations of the third generation, the power dissipation and size of transmitter amplifiers need to be reduced. To meet these needs, Fujitsu has developed a gallium nitride based high-electron mobility transistor (GaN-HEMT) capable of high-voltage operation. By combining a high-power amplifier built using this GaN-HEMT with a digital pre-distortion system, we can satisfy the system requirement for high efficiency. We have also fabricated GaN-HEMTs using large-diameter, low-cost conductive substrates that are suitable for mass production. These devices showed sufficient performance for base-station applications and operated stably under RF stress testing for 1000 h, indicating they are close to being put to practical use. In this paper, we describe our recent progress in developing GaN-HEMT amplifiers.



吉川俊英（きっかわ としひで）
基盤技術研究所化合物デバイス研究部 所属
現在、超高速・高出力デバイスの開発に従事。



常信和清（じょうしん かずきよ）
基盤技術研究所 所属
現在、超高速・高出力デバイスの開発に従事。



久保徳郎（くぼ とくろう）
ワイヤレスシステム研究所RFソリューション研究部 所属
現在、移動通信システムの基地局用装置開発に従事。

ま え が き

移動通信システムは、iモードに代表されるデータ通信サービスのように、いつでもどこでもインターネット接続が可能なサービスを提供するユビキタス社会の重要な担い手となっている。移動通信システムでは2001年から第3世代移動体通信システム（IMT-2000）商用サービスが始まっている。現在、下りの伝送速度は最大2 Mbpsであるが、今後HSDPA（High Speed Downlink Packet Access）では14 Mbpsが可能となり、さらに2010年以後には第4世代による100 Mbps以上も視野に入っている。

しかし、伝送レートの高速化および大容量化は、送信電力増幅器の消費電力の増加をもたらし、基地局装置の消費電力増大や大型化を招く。このため、移動通信システムのサービス向上には、これら移動通信基地局における課題を解決し、設置の容易さと維持コストの低減を目指した移動通信基地局装置の開発が必要となる。

そこで富士通では、移動通信基地局装置の低消費電力化（高効率化）を実現するキーテクノロジーとして窒化ガリウム（GaN）高電子移動度トランジスタ（HEMT：High Electron Mobility Transistor）を用いた高出力送信電力増幅器の開発を行っている。また、この開発では富士通独自のひずみ補償回路技術とGaN-HEMT増幅器を組み合わせ、世界最高の効率を得ることに成功した。また、低コスト化技術と信頼度についても併せて検討した。

本稿では、まず移動通信システム用基地局の今後のサービス拡大に向けた課題を述べ、そして、この課題を解決する送信電力増幅器の開発要件について説明する。つぎに、この開発要件を満たすGaN-HEMTとGaN-HEMTを用いた高出力送信増幅器の開発を紹介する。最後に、GaN-HEMTの低コスト化技術と信頼度について紹介する。

大容量基地局向け送信電力増幅器の開発要件

本章では、今後の移動体通信システム用基地局の課題と、この課題を解決するかぎとなる送信電力増幅器の開発要件について述べる。

移動通信基地局（以下、基地局）は多数のユーザを収容するために複数のコードチャネル、複数の無

線周波数キャリアを多重化した信号を、基地局から端末への下りリンク信号として無線伝送する。高速なインターネット環境、高速データ伝送の実現に向け、高速かつ柔軟なデータ伝送を可能とするCDMA（Code Division Multiple Access）技術の一つであるW-CDMA方式を用いた第3世代移動通信システム（IMT-2000）が現在商用化されている。移動通信システムの開発状況と今後の見込みを図-1に示す。今後、さらに、伝送レートの高速化と大容量化に対する期待が高まる一方、基地局装置全体の消費電力と設置スペースが限界に達してきており、今後の移動通信システム用基地局装置実現に向けた重要開発課題となっている。とくに基地局では送信電力増幅器の消費電力と大きさが基地局の消費電力や設置スペースの大きな部分を占めるため、この課題に対応した送信電力増幅器の開発が今後の基地局大容量化のかぎを握る。

以下に大容量基地局用送信電力増幅器に対する開発要件について説明する。

（1）低消費電力（高電力効率）

基地局装置内で電力を最も消費するのは送信用電力増幅器であり、装置全体の約半分程度を消費している。低消費電力化には電力効率（増幅器の消費電力に対する無線出力電力の比）を高くする増幅デバイスの開発が必須である。第3世代移動体通信システムでは多チャネルを同時に増幅することも必要であり、高効率動作でありながら高出力特性であることも求められている。

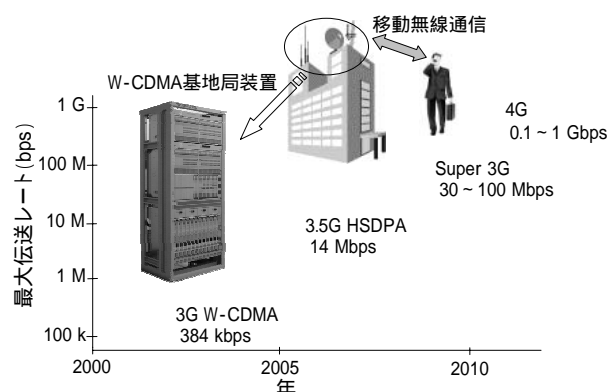


図-1 移動通信システムの下り伝送レートの開発状況と今後の見込み
Fig.1-Trend of down link rate of mobile communication system.

(2) ひずみ補償技術適応性

CDMA技術を用いるIMT-2000システム用の送信電力増幅器には、CDMAに特有の広帯域・高ダイナミックレンジの信号を低ひずみで増幅する線形性が求められる。

しかし一般的に線形性と高い電力効率とは相反する特性であるため、より効率の高い非線形領域を用いて線形な増幅を可能とするひずみ補償技術の開発が活発に行われている。ひずみ補償技術の中でも、発生するひずみの逆特性をあらかじめ加えておくことでひずみ補償を行うデジタルプリディストーション(DPD: Digital PreDistortion)方式⁽¹⁾に基づく新しいひずみ補償技術が近年注目され、実用化⁽²⁾も始まっている。今後の送信増幅器にはDPD方式を適用しやすいひずみ特性が求められている。

(3) 低コスト

基地局設置コストの更なる低コスト化のため、増幅デバイスにも低コスト化が求められており、高い量産性と安定した性能が必要となる。

基地局用デバイスの要件を満たすGaN-HEMT

本章では、大容量基地局の送信電力増幅器で用いられるデバイスの要件を実現するGaN-HEMTの概要を述べる。

GaNは青色LEDとして信号機などに使用されている。GaNの物性値と従来の半導体材料の比較を図-2に示す。シリコン(Si)やガリウム砒素(GaAs)など従来の半導体材料に比べてGaNは電

材料	破壊電界 (MV/cm)	熱伝導率 (W/cm/K)	走行 電子濃度 (/cm ²)	移動度 (cm ² /Vs)	飽和 電子速度 (cm/s)
Si	0.3	1.5	$\sim 10^{12}$	1,300	1×10^7
GaAs	0.4	0.5	$\sim 10^{12}$	2,000 ~ 4,000 (MESFET)	1.3×10^7
SiC	3.0	4.9	$\sim 10^{12}$	600	2×10^7
GaN	3.0	1.5	$\sim 10^{13}$	1,500 (HEMT)	2.7×10^7

■: 高電圧動作, 高出力動作を達成できる物性値を示す。

図-2 窒化ガリウム(GaN)物性値と従来の半導体材料との比較

Fig.2-Comparison of Material parameter of gallium nitride (GaN) with conventional semiconductor materials.

圧による破壊に強いいため高電圧動作が可能となる。

高電圧動作デバイスは理想限界に近い高効率を得やすい特徴がある。さらに、現在の基地局システムでは、高出力増幅器の動作電圧が基地局のシステム電源電圧に比べて低いため、電源電圧変換回路が用いられている。高い動作電圧によって、電圧変換量が少なくなれば、基地局の小型化と低消費電力化が可能となる。

また高出力動作時には熱の発生が課題となるが、基板として炭化珪素(SiC)を用いた場合、SiCの熱伝導率は金よりも大きく、熱を放散しやすい特長を持つ。つまりGaNは高電圧動作と高出力性能を達成できる物性条件を満たしている。

一方、HEMTは、バンドギャップの異なる半導体材料との接合界面に生じる電子層が通常の半導体内に比べて高速で動作することを利用した電界効果型トランジスタである。1980年に富士通が世界に先駆けて開発し、現在、衛星放送用受信機や携帯電話機、GPSを利用したナビゲーションシステム、広帯域無線アクセスシステムなど、IT社会を支える基盤デバイスとして広く使用されている。

GaNをHEMT構造{図-3(a)}として用いる場合、GaN層と窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)という異なる2層を積層するが、従来の半導体材料系に比べて高い電流密度を得ることができる。従来の半導体材料の場合、不純物ドーピングによって走行電子(2次元電子ガス)を生成させていた。GaNは、イオン性結合が強く、かつ圧電効果も発生するため内部に電界が生じる(自然分極とピエゾ分極)。この電界は不純物ドーピングによる電界よりも強く、

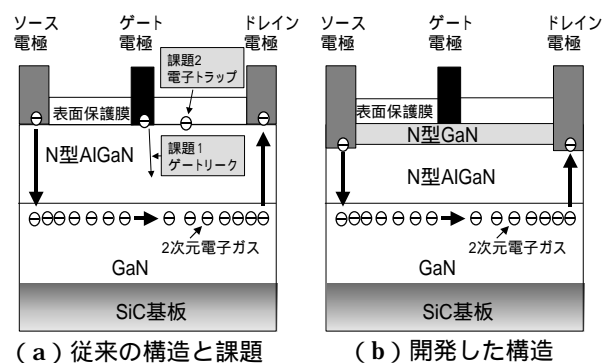


図-3 GaN高電子移動度トランジスタ(HEMT)の断面構造
Fig.3-Schematic view of GaN high electron mobility transistor (HEMT).

このために従来の半導体材料に比べて10倍の走行電子を生み出すことができる。その結果、電流密度が増加する。よって従来のトランジスタに比べて高出力・高効率での動作が期待できる。このことから、次世代の高出力増幅器としてはGaNを用いた増幅器に期待が寄せられている。

GaN-HEMTの開発

本章では、開発要件を実現する上でのGaN-HEMTの問題とこの問題を解決したGaN-HEMTの開発技術について述べる。

GaNを図-3(a)のようなHEMT構造にして実際に高電圧動作させてみると、以下の問題が見出された。

- (1) 本来流れないはずのゲート電極からのリーク電流が大きい。
- (2) 高周波高出力動作をさせたとき、走行電子が素子内にトラップされて出力電流が低下してしまう(電流コラプス現象)。

このため高電圧動作トランジスタとしての十分な特性を得ることができていなかった。

そこで、これらの問題を解決するために、図-3(b)に示すトランジスタ構造を持つGaN-HEMTを開発した。まずゲートリーク抑制のため、GaN-HEMTとゲート電極との界面を制御することが重要であることに着目し、HEMT構造の表面部分にN型不純物をドーピングした導電性窒化ガリウム層を用いた表面電荷制御構造⁽³⁾を提案した。通常のGaAs系など

で用いられているオーミック特性を改善するための高濃度表面層とは考えが全く異なり、不純物ドーピングしていてもそこに高濃度の電子が存在するわけではなく、完全に空乏化している。本構造の優位性を検証し、デバイス構造を設計するため、デバイスシミュレーションによりデバイス内の電界分布を計算した結果を図-4に示す。従来構造の場合、ゲート電極近辺に電界強度の非常に高い部分が存在することが分かった。この電界集中がゲート電極からのリーク電流の原因である。今回開発した表面電荷制御構造の場合、ゲート電極近傍に電界集中が起きていないため、ゲート電極からのリーク電流低減が期待される。

また電流コラプス現象に関しても酸化しやすいアルミニウムを半導体表面に持たないため、半導体表面電子トラップに起因した電流コラプス現象の抑制が期待される。GaNバッファ層中の電子トラップに関しては成長条件の最適化により電子トラップの低減を行った。

今回開発した表面電荷制御構造のゲートリーク特性を図-5(a)に示す。耐圧は従来の100 V以下から350 Vまで改善することに成功した⁽⁴⁾。

従来構造での典型的な三端子電流電圧特性を図-5(b)に示す。ヒステリシスがあり電流コラプスが発生していることが分かる。今回開発した表面電荷制御構造の電流電圧特性を図-5(c)に示す。表面側電子トラップを低減し、かつ窒化ガリウム

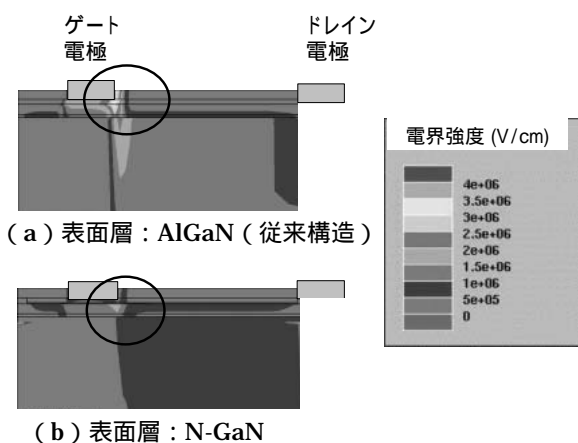


図-4 GaN-HEMT断面の電界強度シミュレーション結果
Fig.4-Results of electrical field simulation of GaN-HEMT.

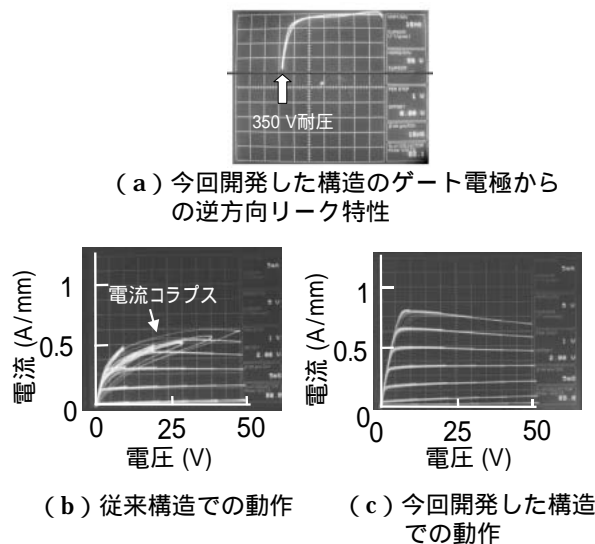


図-5 GaN-HEMTの電气的特性
Fig.5-Electrical characteristics of GaN-HEMT.

バッファ層を最適化したため、電流コラプスなく動作させる⁽⁴⁾ことができた。

高効率GaN-HEMT増幅器の開発

本章では、開発したGaN-HEMTを用いて大容量基地局用送信増幅器の開発要件を実現したGaN-HEMT増幅器について述べる。

ゲート電極からのリーク電流と電流コラプスの抑制に成功したゲート幅36 mmのGaN-HEMTチップを用いて増幅器を作製した。実用上最も重要な動作条件である第3世代携帯電話基地局用W-CDMA信号での高効率増幅に成功し、63 V動作・174 W出力の特性^{(5),(6)}を得た。このチップを2個並列使用したプッシュプル型増幅器では50 V動作で最大出力250 W⁽⁴⁾をW-CDMA信号で得た。これは世界最高出力を示すGaN-HEMT増幅器である。

さらに、この増幅器にDPD方式を適用し、W-CDMAに要求される送信信号規格（隣接チャネル漏えい電力比・スペクトラムエミッションマスク・変調精度・ピークコードドメインエラーなど）を満足するかを調べた。DPD-GaN-HEMT増幅器によりW-CDMAの4キャリア信号を増幅した場合の送信出力スペクトラム特性⁽⁵⁾を図-6に示す。DPDにより高次ひずみが抑圧され、隣接チャネル漏えい電力を大幅に改善できている。規格を満足させた状態での電力効率は40%に達し、従来の半導体材料系に比べて10ポイント以上高く世界最高効率を持つ高出力特性を得た。

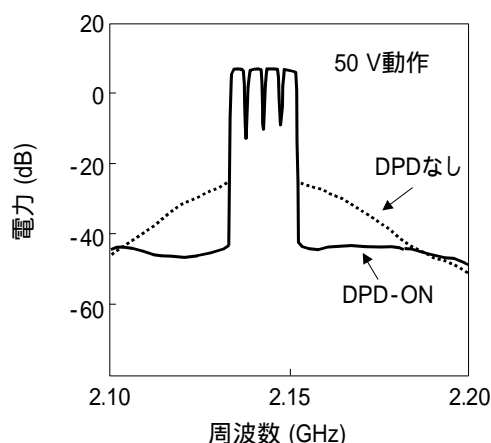


図-6 送信出力スペクトラム
Fig.6-Power spectra of power amplifier.

低コスト化技術

本章ではGaN-HEMTの量産に向けて開発した低コスト化技術について述べる。

GaN-HEMTの作製コストでは、基板起因のコストが最も高く、量産時にはその低減が必須となる。基板コスト低減には大口径かつ低コスト材料の二つの特徴を持つ基板を使用すべきである。よって3インチ径以上の基板で高均一HEMTを作製する技術と、導電性SiC基板を高周波で使用する技術を低コスト化技術として開発した。

まず大口径化について述べる。現在、GaN-HEMTの研究試作段階では2インチ基板が使用されることが多い。大口径化すると均一性劣化や基板の反りが発生するためである。しかし、化合物半導体材料を用いたデバイスの量産時には、3インチ以上の基板径が必須である。今回、均一性と反りの問題を改善し、4インチA面サファイアと3インチ半絶縁性SiC基板上にステップ露光を用いてHEMTを作製した。ウエハ写真のを図-7に示す。3インチ半絶縁性SiC基板上のHEMTはしきい値電圧の標準偏差も20 mVとGaAsなどと同レベルの均一性に達している。これはHEMT結晶の均一性が高いだけでなく、反りも改善されてステップ露光の精度も高くなり、ゲート長が均一にできたことも示している。

つぎに低コスト材料について述べる。低コスト基板材料としてはSi基板が有利であるように思われるが、熱伝導率が悪く、熱に起因する問題が生じる。SiC基板は熱的に有利であるが、高周波デバイスに

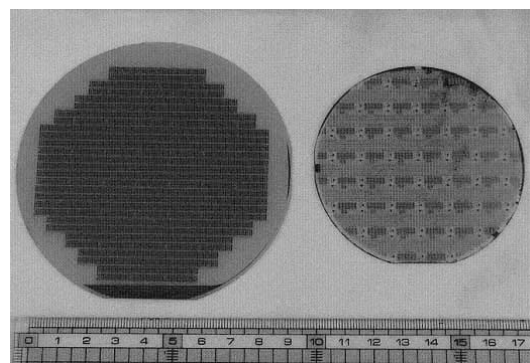


図-7 大口径基板上に作製したGaN-HEMT
Fig.7-GaN-HEMT fabricated on large diameter substrates.

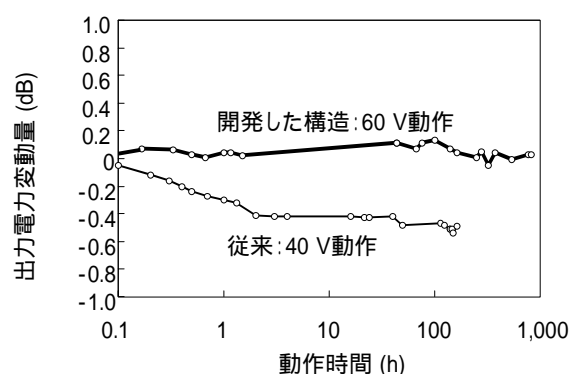


図-8 RF過剰入力状態でのストレステスト
Fig.8-Stress test under overloaded RF input.

通常使用される半絶縁性基板の生産量は少なく、価格が高い。ただしLED、レーザ、ショットキダイオードなどで利用されている導電性SiC基板が存在する。これは既に量産・大口径化されているために価格も安い。このため、低コスト基板として導電性SiCの使用を検討した。以下に導電性基板を高周波で使用する場合の二つの問題を示す。

- (1) 基板と表面電極との間の寄生容量を介して入出力高周波信号が基板へ流れることによる電力損失。
- (2) 基板を流れるリーク電流による隣接トランジスタ間の素子分離不良。

上記問題の解決法として大信号モデルをもとにした回路シミュレーションにより、基板とHEMT構造の間に膜厚10 μm 以上の窒化アルミニウム(AIN)層をバッファ層として用いる技術を開発した。寄生容量とリーク電流の問題を同時に解決し、1チップで100 Wを超える出力^{(8),(9)}を導電性SiC基板で初めて得た。

信 頼 度

GaN-HEMTの実用化には信頼度の検討が必須である。加速試験として通常時よりも入力電力を増やした過剰入力テスト⁽⁴⁾を行った場合の結果を図-8に示す。従来は10 hまでに劣化して飽和する傾向が見られていたが、今回開発したGaN-HEMTでは加速試験状態でも1,000 h以上安定であることを示した。この信頼度は世界最高である。表面電化制御構造が信頼度的にも有利であることを示している。今後は長期信頼度の活性化エネルギーの検討が必要であるもののGaN-HEMTが実用化レベルに近いことを示

した。

む す び

本稿では、大容量基地局用高出力送信電力増幅器のデバイスとして開発したGaN-HEMTと、このGaN-HEMTを用いて開発している高出力高効率増幅器を紹介した。

GaN-HEMTの開発では、今回、表面にN型の導電性GaN層を導入した表面電化制御構造を開発し、ゲート電極からのリーク電流と電流コラプスの抑制を達成した。その結果50 V動作・250 Wの高出力特性を得た。

またGaN-HEMTを使用した増幅器の開発では、DPD方式のひずみ補償回路によるひずみ補償を適用し、W-CDMAの規格を満たす実使用条件において40%の高電力効率を得ることに成功した。これは従来の半導体材料系に比べて10ポイント以上高い。

低コスト化技術として大口径基板と低コスト導電性基板の検討も行った。3インチ以上径で均一動作するHEMT作製と半絶縁性基板と同等な導電性基板上HEMT作製に成功した。

信頼度の初期特性検討も行い、本構造が過剰入力ストレスに対して安定であることが分かった。1,000 hの信頼度データを示しているのは富士通のみである。

以上のように、GaN-HEMTが大容量基地局向けに最適な利点を持ち、かつ実用化レベルに近いことを世界に先駆けて実証した。

参 考 文 献

- (1) 石川広吉ほか：W-CDMA基地局用適応歪補償装置の開発．電子情報通信学会，2002年ソサイエティ大会，C-2-31，p.53 (2002)．
- (2) 富士通(株)プレスリリース．
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2002/09/5.html>
- (3) T. Kikkawa et al. : Surface-Charge-Controlled AlGaIn/GaN-Power HFET without Current Collapse and Gm Dispersion . IEDM Tech. Dig. , December 2001 , p.585-588 .
- (4) T. Kikkawa et al. : An Over 200-W Output Power GaN HEMT Push-Pull Amplifier with High Reliability . IEEE Int. Microwave Symp. Dig. , June

2004 , p.1347-1350 .

- (5) K. Joshin et al. : A 174 W High-Efficiency GaN HEMT Power Amplifier for W-CDMA Base Station Applications . IEDM Tech. Dig. , December 2003 , p.983-985 .

- (6) 富士通 (株) プレスリリース .

<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2003/12/8.html>

- (7) T. Kikkawa et al. : Highly-Reliable GaN HEMT Transmitter Amplifier with Output Power of Over 200 W for Wireless Base Station . Extended Abstracts

of Inter. Conf. Solid State Devices and Materials , September 2004 , p.320-321 .

- (8) 富士通 (株) プレスリリース .

<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2004/12/21.html>

- (9) M. Kanamura et al. : A 100 W High-Gain AlGaIn/GaN HEMT Power Amplifier on a Conductive N-SiC Substrate for Wireless Base Station Applications . IEDM Tech. Dig. , December 2004 , p.799-802 .

