

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 8 月 22 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560321

研究課題名（和文）高効率・低ひずみ超高周波カスコード電力増幅器に関する研究

研究課題名（英文）A study of high-efficiency low-distortion cascode power amplifiers

研究代表者

高山 洋一郎（TAKAYAMA YOICHIRO）

電気通信大学・先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター・客員教授

研究者番号：90336826

研究成果の概要（和文）：超高周波電力増幅器の高利得高出力化の回路手法として注目されているカスコード回路について，従来構成に比べて設計の自由度を拡げることにより電力効率の向上及びひずみ低減が期待できる独立バイアス形カスコード電力増幅器を提案して，Ga<sub>N</sub> HEMT，InGaP/GaAs HBT 及び GaAs pHEMT MMIC による各提案回路構成の 2GHz 帯増幅器を設計製作し，従来構成のカスコード増幅器に比べて電力効率及びひずみ特性の優れた増幅器を実現した。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new cascode circuit with independently biased transistors, which makes possible stable dc operation and independent setting of transistor operating modes. In consequence, the circuit can realize high-efficiency and low-distortion power amplifier. Microwave power amplifiers with the proposed configuration consisting of Ga<sub>N</sub> HEMTs was first designed and fabricated. Also, 2 GHz-band power amplifier MMICs using InGaP/GaAs HBTs and GaAs pHEMTs were tried. These amplifiers realized high-efficiency and low-distortion performances, as expected.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：超高周波，電子回路，電力増幅器，カスコード回路

## 1. 研究開始当初の背景

(1)高度化するワイヤレス通信システムのマイクロ波・ミリ波などへの超高周波化に向けて，超高周波半導体デバイスはますます微細化が進みつつある。とくに送信電力増幅器は通信品質，電力効率，機器コストなどを支配するキーデバイスであるが，トランジスタの微細化はデバイス耐圧の低下による動作電圧の低下が避けられない状況となり，その結

果，電力増幅器の出力電力の高出力化及びひずみ特性などの向上が深刻な課題となっている。

(2)こうした課題に対応してカスコード回路が採用されつつあるが，従来の回路はバイアス設定が限定されるため電力効率やひずみ特性の向上には限界があるため，更なる特性の向上が期待できる技術が求められている。

## 2. 研究の目的

(1)トランジスタ電力増幅器は、FET の場合、ゲートバイアス電圧値により A, B あるいは C 級などの動作モードにより増幅動作を行うが、動作モードにより増幅電力効率及びひずみ特性が変わり、通常、両特性はトレードオフの関係にある。FET カスコード回路は、前段のソース接地 FET のドレイン端子と後段のゲート RF 接地の FET のソース端子を直接接続して後段ドレイン端子を出力端子とする構成である（バイポーラでも同様）。従来の構成では両トランジスタのゲート及びドレインバイアス電圧を独立に設定できないため各 FET 増幅動作モードを自由に設定できない。このため、特性の最適化が難しくなる。

(2)申請者提案のカスコード回路は両トランジスタのゲートバイアス及びドレインバイアス電圧を独立に設定できるため、両トランジスタの振る舞いを明らかにすることにより、両トランジスタのバイアス電圧設定の最適化により増幅器としての電力効率及びひずみ特性の向上を実現できることを示す。

## 3. 研究の方法

(1)平成 22 年度は、提案したカスコード増幅器のひずみ特性について簡易非線形等価回路モデルによる解析により振幅ひずみ特性及び三次相互変調ひずみ(IMD3)特性の基本的な振る舞いを検討し、また大信号 FET モデルによる回路シミュレーションにより、RF 電力特性、電力効率、ひずみ特性の両 FET バイアス条件依存性を調べた。また、実際の増幅器において実証するため、GaN HEMT を用いて 1.9GHz 独立バイアス形カスコード電力増幅器を設計製作した。さらに、1.9GHz InGaP/GaAs HBT による増幅器 MMIC を設計した。

(2)平成 23 年度は、前年度設計の HBT MMIC のファウンドリ製作を行い、測定評価を行った。さらに、回路損失の増加を避けるため、整合回路を集中素子によるハイブリッド回路により構成したカスコード電力増幅器を設計製作した。また、HBT と FET では前段と後段のトランジスタの振る舞いが異なることが明らかになったので、比較のため、GaAs pHEMT の独立バイアス形カスコード増幅器の MMIC を設計した。

(3)平成 24 年度は、HBT 増幅器 MMIC と比較を行うため、また増幅器の小型化を目指して、昨年度設計した GaAs pHEMT によるカスコード増幅器 MMIC をファウンドリにより製作し、特性の評価を行った。また、提案したカスコード増幅器の高性能化の可能性を示すため、バイアス設定の変更による従来形カスコード増幅動作との比較検討を行った。

## 4. 研究成果

(1)まえがき：トランジスタ微細化に伴う耐

圧低下によるマイクロ波・ミリ波電力増幅器の高出力化の限界に対応する手法として利用が進んでいるカスコード回路構成は、二個のトランジスタ (FET) を図 1 のように直接接続して用いる。この回路の安定な直流動作点 (図 2 Q 点) はバイアス電圧の設定許容範囲が狭く、結果として増幅動作モードの選択の余地が限られたため特性の追求には限界があった。

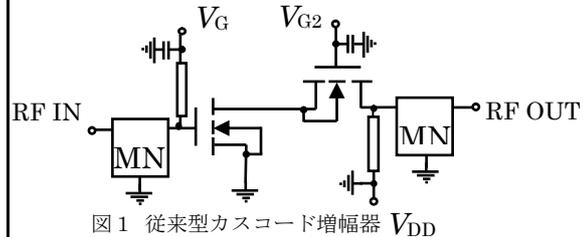


図 1 従来型カスコード増幅器  $V_{DD}$

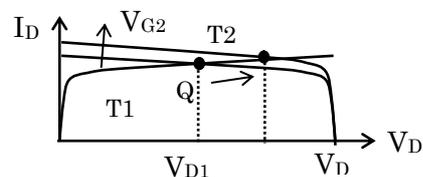


図 2 ソース接地 FET T1 の直流負荷線と動作点

本研究の独立バイアス形カスコード構成は図 3 に示す両トランジスタ接続点に新たにバイアス供給端子  $V_{DD1}$  を設けて、各トランジスタのバイアスを独立に設定できるようにしている。これにより、両トランジスタの増幅動作モードを独立に最適化設定することができ、増幅特性の向上が期待できる。

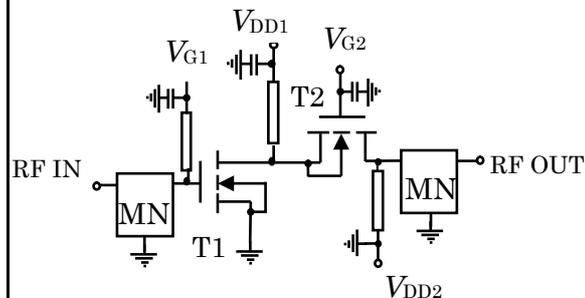


図 3 独立バイアス形カスコード増幅器

### (2)独立バイアス形カスコード増幅器の特性解析

カスコード増幅器の基本的な振る舞いを調べるため図 4 の簡易非線形等価回路により特性を解析した。

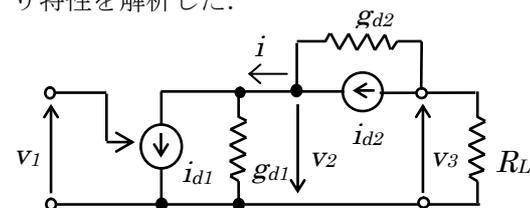


図 4 ひずみ解析のための簡易等価回路

①一波入力の場合：各 FET のドレーン電流を次式により表現する。

$$\begin{aligned} i_{d1} &= i_{d10} + g_{m1}v_1 + g_{m2}v_1^2 + g_{m3}v_1^3 \\ i_{d2} &= i_{d20} + g_{m1}'v_1 + g_{m2}'v_1^2 + g_{m3}'v_1^3 \end{aligned} \quad (1)$$

前段及び後段入力信号を

$$\begin{aligned} v_1 &= A \cos \omega t \\ v_2 &= AG_{v1} \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

と置くと電流  $i$  の基本波成分関係式から次式を得る。ただし  $g_{m1} \gg g_{d1}$  と仮定する。

$$\frac{v_2}{v_1} = G_{v1} = \frac{g_{m1}(1 + g_{d2}R_L)}{g_{m1} + g_{d1} + g_{d2} + g_{d1}g_{d2}R_L} \quad (3)$$

ここで負荷整合条件を用いると次の近似式を得る。

$$\frac{v_2}{v_1} = G_{v1} \cong \frac{1}{1 + \alpha} \left( \frac{g_{m1}}{g_{d1}} \right) \quad (4)$$

ここで  $\alpha=1$  は小信号整合条件である。さらに  $v_1, v_3$  の関係も求まる。

式(3)より以下の予想ができる：

・  $G_{v1} \gg 1$  の場合、振幅ひずみは後段 FET の  $g_{m3}$  で決まる。

・  $G_{v1} \approx 1$  の場合、前段及び後段 FET の  $g_{m3}$  の逆符号選択によりひずみ打消し低減が可能である。

②等振幅二波入力の場合：

等振幅二波入力信号を次式と置く。

$$v_1 = A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \quad (5)$$

3 次相互変調ひずみドレーン電流成分は

$$\begin{aligned} i_{d1\Delta\omega} &= 0.75g_{m3}A^3(\cos \alpha + \cos \beta) \\ \alpha &= 2\omega_1 t - \omega_2 t, \quad \beta = 2\omega_2 t - \omega_1 t \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ここで図 2 の各電圧を次式に置く。

$$\begin{aligned} v_2 &= B(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + v_{2\Delta\omega} \\ v_3 &= v_{3\omega} + v_{3\Delta\omega} \end{aligned} \quad (7)$$

$v_{2\Delta\omega}, v_{3\Delta\omega}$  はそれぞれ  $v_2, v_3$  の  $\alpha, \beta$  周波数成分である。図 4 の電流  $i$  の三次相互変調ひずみ成分関係式から三次相互変調ひずみ成分  $v_{3\Delta\omega}$  を得る。

$$v_{3\Delta\omega} = \frac{0.75R_L A^3 X \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{g_{m1}}{g_{d2}} \right) \right] \left( \frac{g_{m3}}{g_{d1}} \right) + G_{v1}^3 \left( \frac{g_{m3}}{g_{d2}} \right) \right\}}{\frac{1}{g_{d1}} \left( 1 + \frac{g_{m1}}{g_{d2}} \right) + \frac{1}{g_{d2}} + \frac{1}{R_L}} \quad (8)$$

①  $g_{m1} \gg g_{d1}$  の場合、通常、 $G_{v1} \gg 1$  となり、IMD3 は T2 のひずみ特性に左右される。② T1, T2 の  $g_{m3}$  の符号が異なる場合、ひずみ打ち消しによる低減が期待できる。 $g_{m3}$  はゲートバイア

ス電圧をしきい値電圧から増加させるに伴って正の値から零になりさらに負の値へと変化する。これらのひずみ特性の結果は(a)の一波入力解析の結果と符合する。

具体的には、GaN HEMT, InGaP/GaAs HBT 及び GaAs pHEMT MMIC による増幅器を検討した。

(3) GaN HEMT カスコード増幅器

GaN HEMT を用いた独立バイアス形カスコード電力増幅器を設計・製作した。回路構成を図 5 に、FET チップ搭載部及び増幅器写真を図 6 に示す。二個の FET は同一サイズである。二倍波整合の採用及び独立バイアス形の特徴を生かして両 FET のドレーン及びゲートバイアス条件の最適化を進めた結果、1.9GHz で飽和出力 30.8dBm, 最大ドレーン効率 66%, 付加電力効率 (PAE) 65.5%, 三次相互変調ひずみ (IMD3) -33.7dBc 以下 @ Pout 26.3dBm 以上, PAE 39.7% 以上の良好な特性が得られた。従来形 GaN HEMT カスコード構成との比較でも優れた特性を得ることができた。

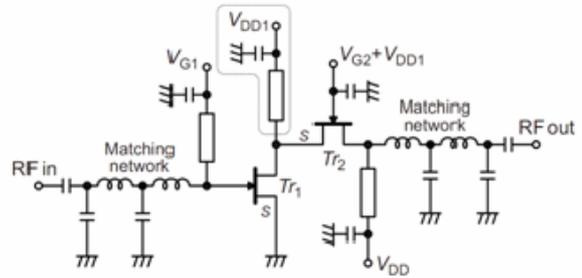


図 5 独立バイアス形 GaN HEMT カスコード増幅器回路

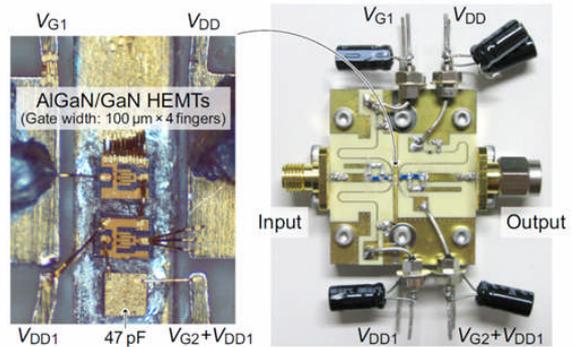


図 6 GaN HEMT カスコード増幅器

(4) InGaP/GaAs HBT カスコード増幅器

FET とバイポーラトランジスタでは、バイアス条件に関して若干振る舞いが異なることが予想されるため、HBT について独立バイアス形カスコード電力増幅器を設計・製作し、特に各 HBT のベース電流依存性を詳しく調べた。HBT については 1.9GHz 増幅器 MMIC を設計・製作したが回路損失が大きく、良好な特性を得ることができなかった。そこで、HBT カスコード部のみ MMIC のハイブリッド回路増幅器を設計製作した。増幅器回路構成及び製作した増幅器を図 7 及び図 8 に示す。整合

回路は集中定数素子のインダクタ及びキャパシタにより構成した。コレクタバイアス電圧は最も良好な特性が得られる前段  $V_{CC1}=1.0V$ 、後段  $V_{CC2}=4.0V$  に設定した。図9に前段 HBT ベースバイアス電流  $I_{B1}$  を一定にして後段 HBT のベースバイアス電流  $I_{B2}$  を変えた場合の IMD3 及び PAE 対全出力電力特性の測定結果を示す。前段  $I_{B1}$  は主に IMD3 に、後段  $I_{B2}$  は主に PAE に影響することが明らかになった。IMD3 < -35dBc を基準にして、 $I_{B1}=0.12mA$ 、 $I_{B2}=0.10mA$  の条件で最大出力 10.25dBm、最大 PAE25.1% の良好な特性を得た。

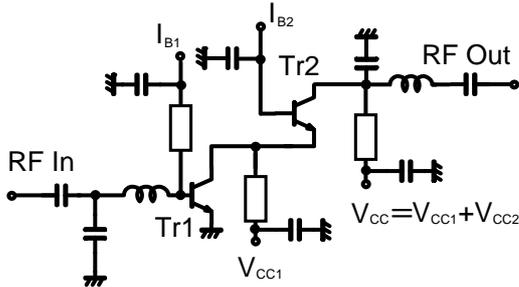


図7 独立バイアス形 HBT カスコード増幅器回路

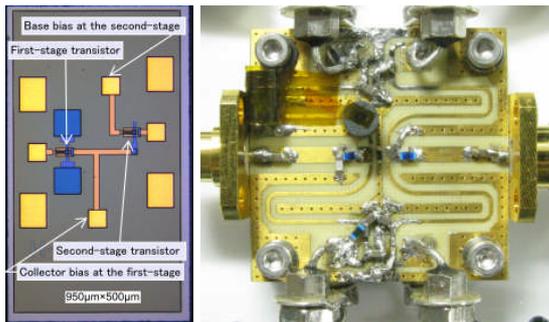


図8 HBT カスコード部及びカスコード増幅器

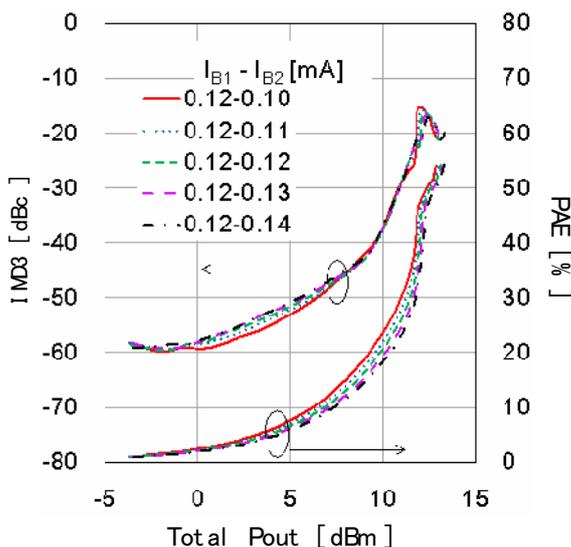


図9 HBT カスコード増幅器特性の後段ベースバイアス電流依存性

(5) GaAs pHEMT カスコード増幅器 MMIC

回路の小型化を図るため、GaAs pHEMT プロセスにより MMIC 化に取り組んだ。独立バイアス形カスコード増幅器の回路図を図10に示す。破線部が MMIC チップである。バイアス回路は樹脂基板に形成している。FET はゲート長  $0.25\mu m$ 、前段全ゲート幅  $600\mu m$  ( $150\mu m \times 4$  本)、後段全ゲート幅  $1200\mu m$  ( $150\mu m \times 8$  本) である。MMIC チップの写真を図11に示す。チップ寸法は  $2.0 \times 0.9mm^2$  である。MMIC チップは樹脂基板により構成したバイアス回路とともに治具にマウントして特性を測定した。

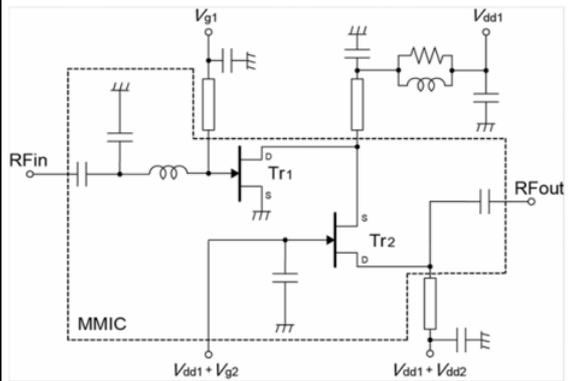


図10 GaAs pHEMT 独立バイアス形カスコード増幅器回路

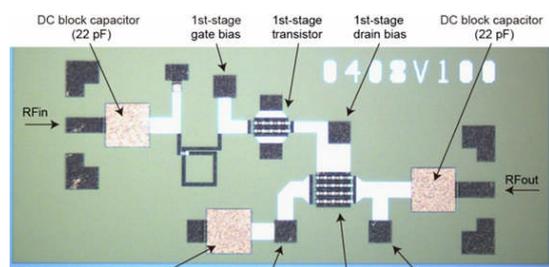
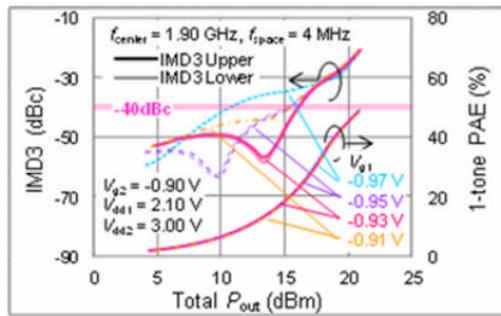


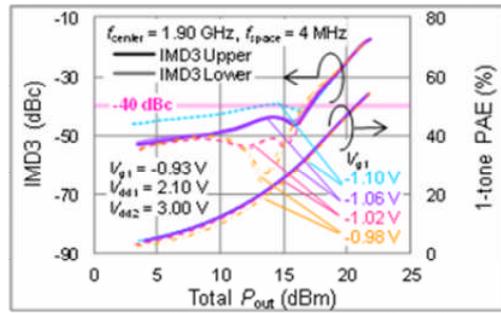
図11 GaAs pHEMT カスコード増幅回路 MMIC チップ ( $2.0 \times 0.9mm^2$ )

図12に総合出力電力に対する一波入力時 PAE 及び周波数間隔  $\Delta f=4MHz$  での IMD3 のゲートバイアス電圧依存性測定結果を示す。同図(a)は前段ゲート電圧  $V_{g1}$  を変えた時、(b)は後段ゲート電圧  $V_{g2}$  を変えた時の特性である。ドレインバイアス電圧は前段  $V_{dd1}=2.5V$ 、後段  $V_{dd2}=3.5V$  である。両図より、 $V_{g1}=-0.93V$ 、 $V_{g2}=-1.06V$  のバイアス条件で、IMD3 < -40dBc を基準とすると、最大出力電力 17dBm、最大 PAE33.3% が得られた。

図13に、最大付加電力効率の周波数特性と、その時の出力電力及び電力利得の測定値を示す。1.2GHz から 2.0GHz の 800MHz の広帯域で最大 PAE53% 以上を実現した。



(a)



(b)

図 12 PAE 及び IMD3 対出力電力のゲートバイアス電圧依存性 (測定値): (a)  $V_{g1}$  依存性, (b)  $V_{g2}$  依存性.

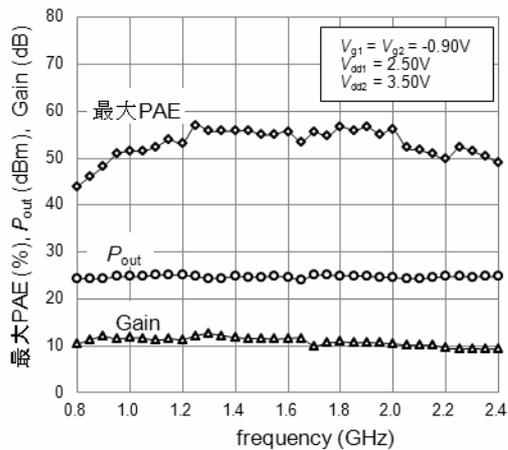


図 13 最大 PAE の周波数特性 (測定値)

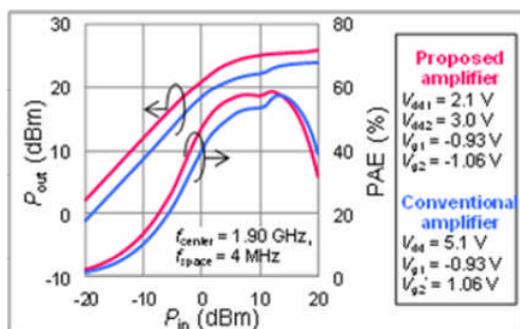


図 14 独立バイアス形及び従来形カスコード増幅特性の比較

さらに, 図 14 に, 従来形カスコード構成と比較した電力特性を示す. 従来形は段間の端子は開放にしてバイアスをかけない状態で測定している. それぞれのゲートバイアス電圧を最も効率が良くなる値に設定して比較している. 独立バイアス形増幅器は出力電力及び効率とも良好な特性を示している.

(6) むすび

提案した独立バイアス形カスコード電力増幅器は両トランジスタのゲートバイアス及びドレーンバイアス電圧を独立に設定できるため, 両トランジスタのバイアス電圧設定の最適化により増幅器としての電力効率及びひずみ特性の向上を実現できることを示した. 等価回路解析を行なうとともに, GaN HEMT, InGaP/GaAs HBT 及び GaAs pHEMT MMIC による増幅器を設計・製作し, 提案した構成のカスコード電力増幅器の優れた特性を確認した.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 9 件)

- ① 田崎悟史, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, 独立バイアス形 1.2-2-0GHz 帯 GaAs pHEMT カスコード電力増幅器 MMIC, 電子情報通信学会総合大会, 2013 年 3 月 20 日, 岐阜大学 (岐阜市).
- ② 田崎悟史, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, 独立バイアス形 1.2-2-0GHz 帯 GaAs pHEMT カスコード電力増幅器 MMIC, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2012 年 12 月 13 日, 山梨大学 (甲府市).
- ③ 高木裕貴, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, 1.9GHz 帯高効率低ひずみ独立バイアス形 InGaP/GaAs HBT カスコード電力増幅器, 2012 年 9 月 12 日, 富山大学 (富山市).
- ④ 石川亮, 高山洋一郎, 本城和彦, 高効率低ひずみ独立バイアス形カスコード GaN HEMT 電力増幅器, 電子情報通信学会マイクロ波研究会, 2011 年 11 月 25 日, 久部良多目的集会所 (沖縄県与那国町).
- ⑤ Ryo Ishikawa, Yoichiro Takayama, Kazuhiko Honjo, High-efficiency, low-distortion microwave cascade power amplifier with independent -ly biased AlGaIn-GaN HEMTs, Korea-Japan Microwave Conference, 2011 年 11 月 10 日, 九州大学 (福岡市).
- ⑥ 高木裕貴, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦, 1.9GHz 帯独立バイアス形 InGaP/GaAs HBT カスコード電力増幅器 MMIC, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, 2011 年 9 月 14 日, 北海道大学 (札幌市).
- ⑦ 高木裕貴, 高山洋一郎, 石川亮, 本城和彦,

独立バイアス形 InGaP/GaAs HBT カスコード電力増幅回路の実験的検討，電子情報通信学会総合大会，2011年3月14日，東京都市大学（東京都）.

- ⑧高山洋一郎，本城和彦，独立バイアス形カスコード電力増幅器の三次相互変調ひずみ解析，電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会，2010年9月14日，大阪府立大学（大阪府堺市）.
- ⑨石川亮，高山洋一郎，本城和彦，独立バイアス形カスコード電力増幅回路の実験的検証，電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会，2010年9月14日，大阪府立大学（大阪府堺市）.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高山 洋一郎 (TAKAYAMA YOICHIRO)  
電気通信大学・先端ワイヤレスコミュニケーション研究センター・客員教授  
研究者番号：90336826

### (2) 研究分担者

石川 亮 (ISHIKAWA RYO)  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教  
研究者番号：30333892

### (3) 連携研究者

本城 和彦 (HONJO KAZUHIKO )  
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授  
研究者番号：90334573