

# 集積回路設計特論(11)

-RFスイッチとMEMS-

AWCC 山尾 泰

# 内容

FETアナログRFスイッチ

GaAs MES FETによるSPDT,DPDTスイッチIC

RF-MEMSデバイス

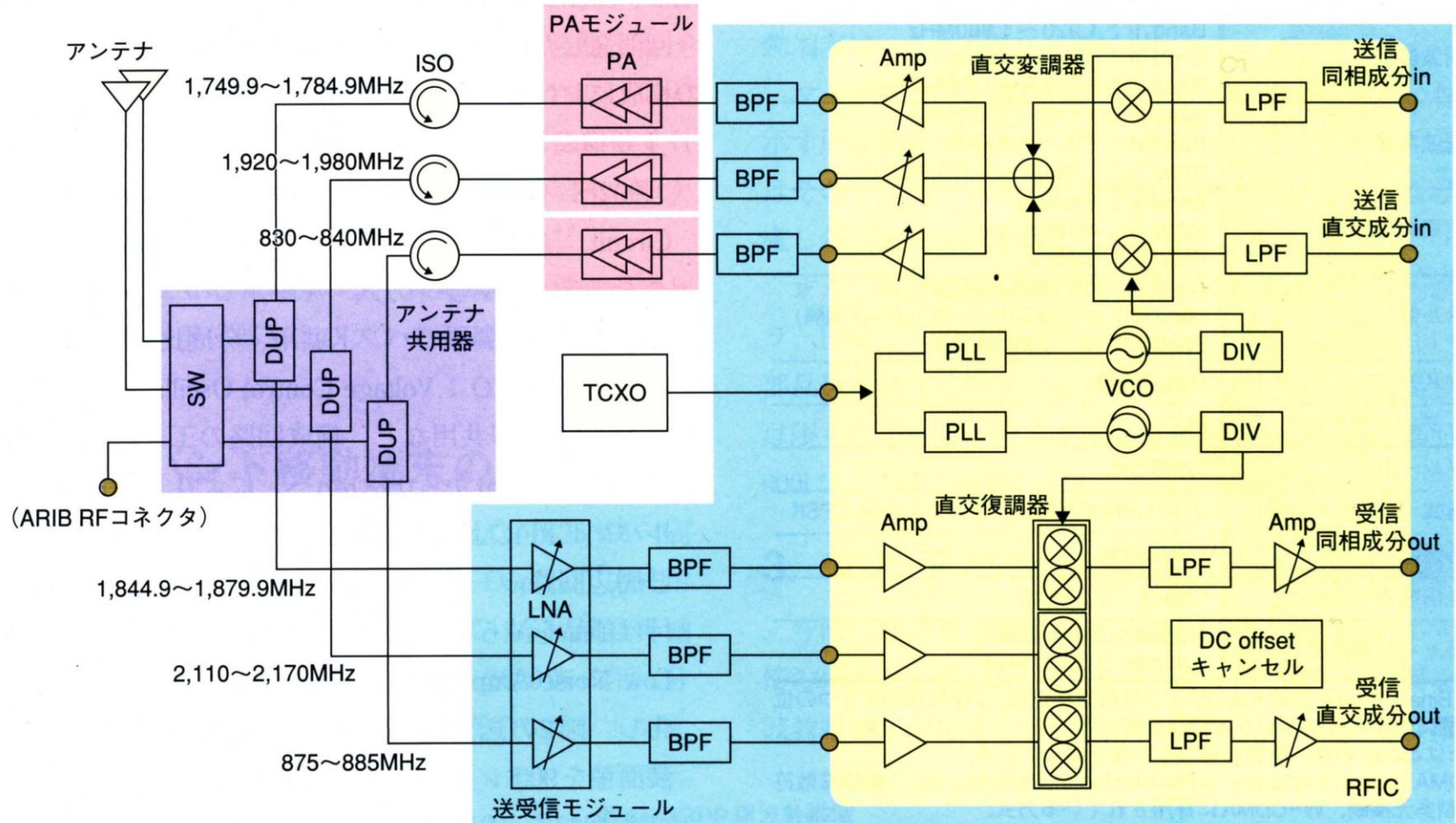
MEMSスイッチを用いたマルチバンド増幅器

# FETアナログRFスイッチ

- 無線通信、とくに携帯通信で用いる周波数バンドの数は増加しており、近い将来は同一国内でも5~6バンドになる可能性がある
- 端末はさらに海外でのローミング機能も搭載され、複数のバンド・複数の方式に対応するものが増えている
- このため**端末でのバンド・無線機対応の切替え**に、低損失のRFスイッチが多く使用されるようになっている
- また複数の電力増幅器や受信フィルタを用いずに、**リコンフィギュラブルタイプの電力増幅器や受信フィルタ**の研究が進められており、これらにもRFスイッチの使用が検討されている

# マルチバンド端末の構成例

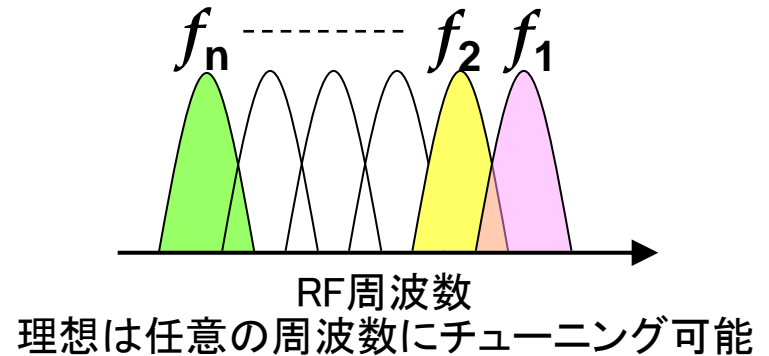
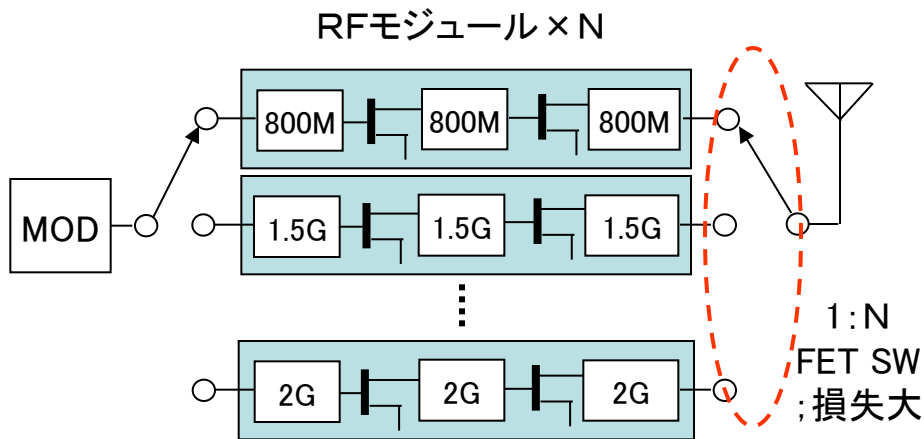
- アンテナは3周波数兼用、送信機・受信機はRF部個別の構成



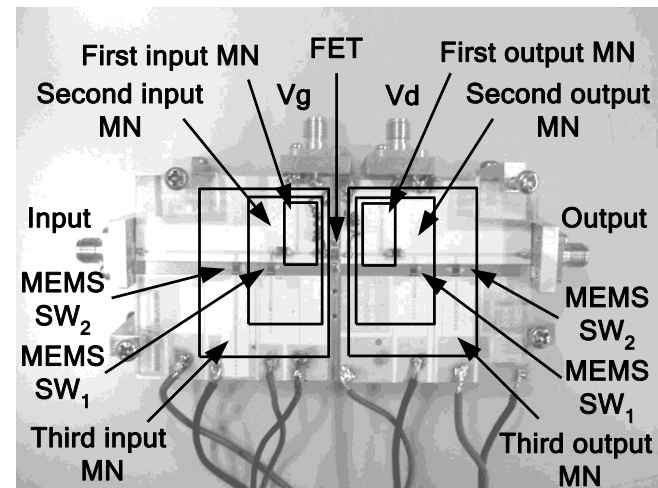
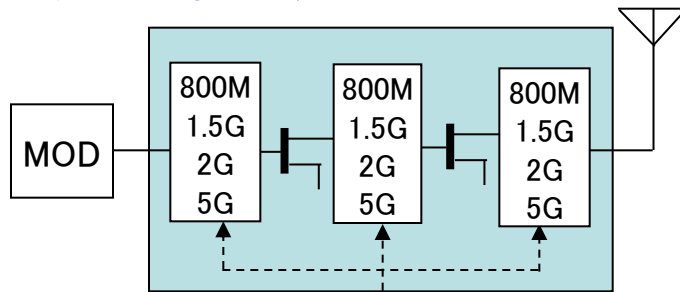
(NTTドコモテクニカル・ジャーナルから転載)

# リコンフィギュラブル電力増幅器

## ● マルチバンドからリコンフィギュラブル、バンドフリーへ



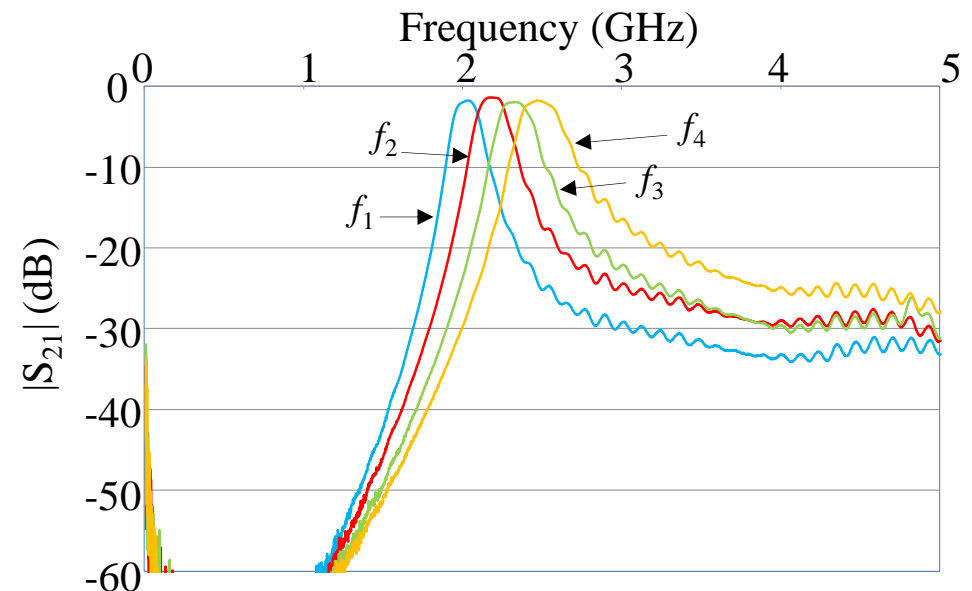
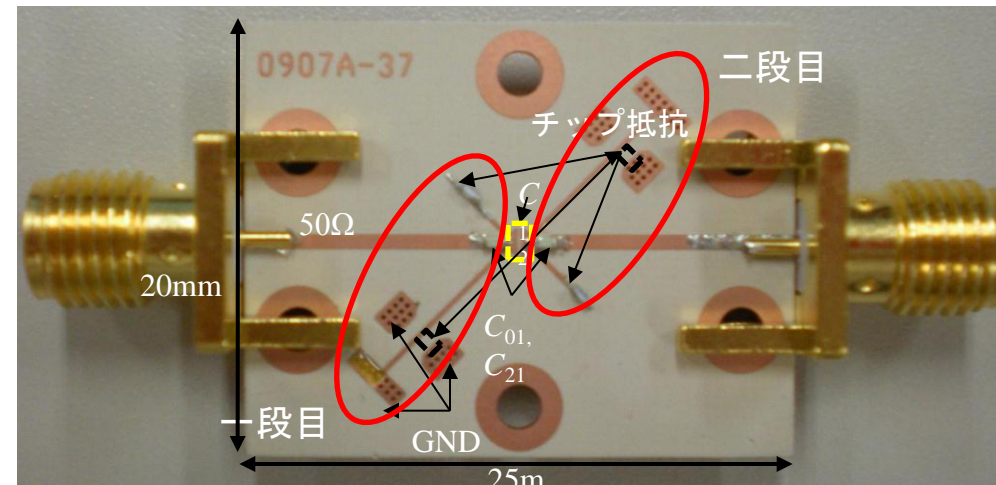
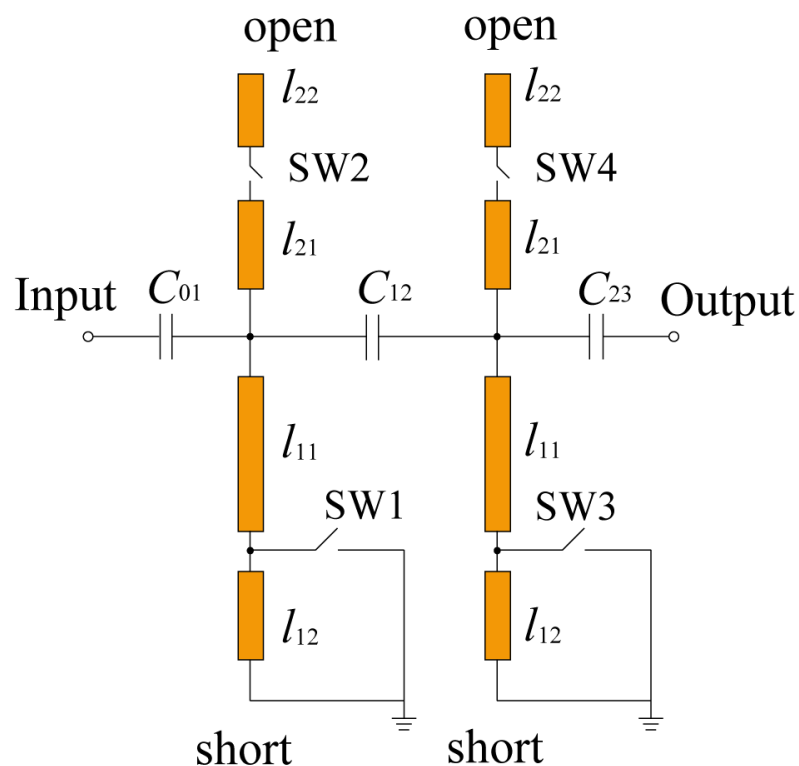
### リコンフィギュラブルRFモジュール



RF-MEMS SWを用いた900MHz/1.5GHz/1.9GHz帯リコンフィギュラブル電力増幅器 (NTTドコモ)

# リコンフィギュラブルバンドパスフィルタ

◆2ビット $\lambda/4$ モード可変周波数共振器を2段縦続接続することで2ビット可変周波数BPFを低損失で実現



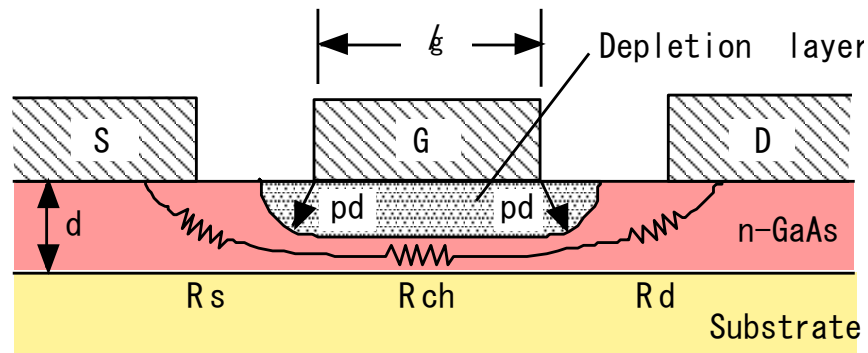
# RFスイッチへの要求条件

---

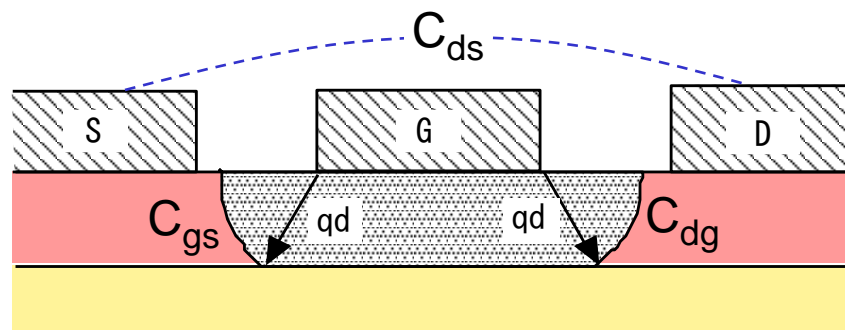
- 低い通過損失
- 高いアイソレーション
- 切替速度

# FETアナログスイッチ

- FETアナログスイッチはゲート電圧でドレーン・ソース間のチャネル抵抗が著しく変わることを利用したもので、GaAs MES FETによるものは制御電圧も2~3V程度と低く、扱いが容易なことから最もよく用いられている



(a) ON-state



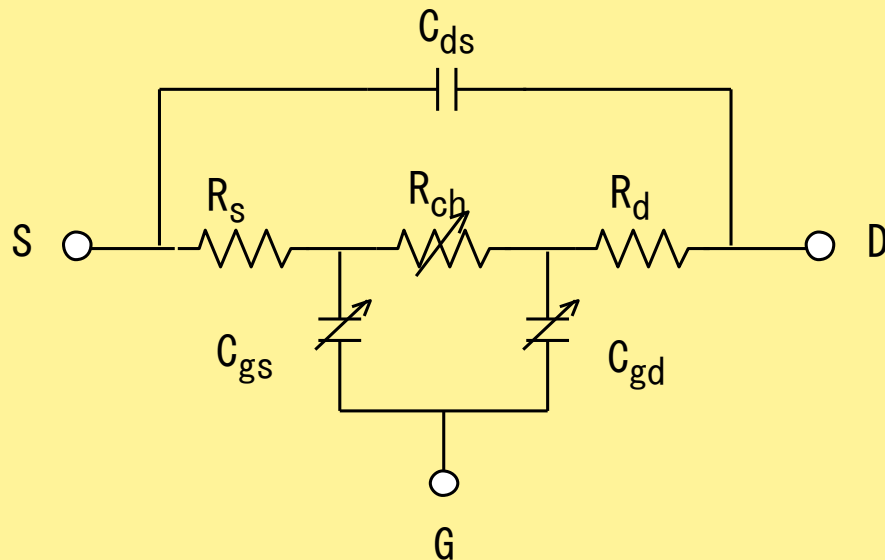
(b) OFF-state

S : Source  
G : Gate  
D : Drain



# FETアナログスイッチの等価回路

## ● FETアナログスイッチの等価回路(5GHz以下)



オン抵抗;

$$R_{on} = R_{ch} + R_s + R_d \propto 1/Wg$$

$C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ ,  $C_{ds}$ の影響が小さい周波数では  
基本挿入損失;(伝送線路インピーダンス  $Z_0$ )

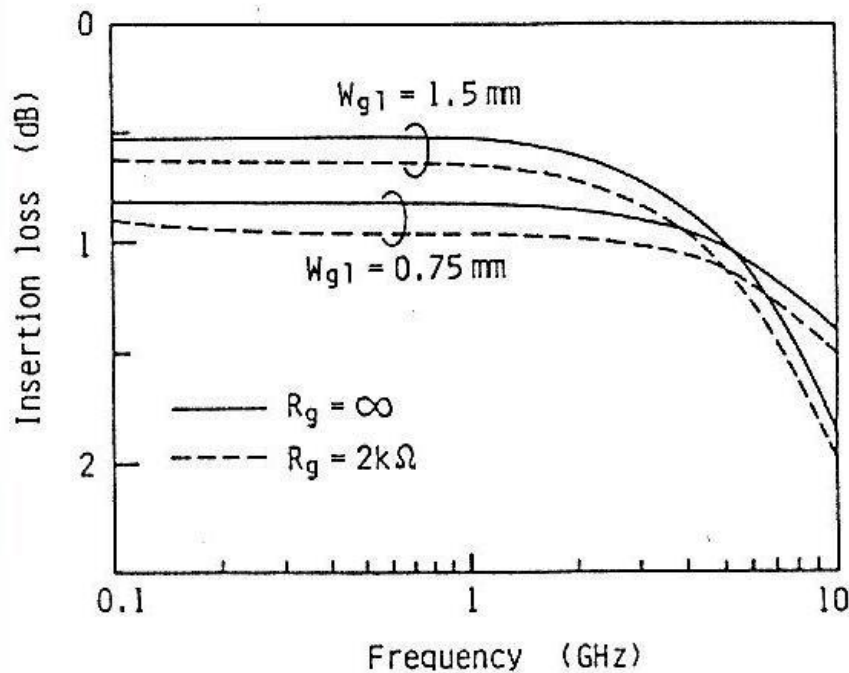
$$L = 10 \log \left( \frac{2Z_0 + R_{on}}{2Z_0} \right)^2 \text{ (dB)}$$

例)  $Z_0 = 50 \Omega$ ,  $R_{on} = 6 \Omega$ の時  $L = 0.51 \text{ dB}$

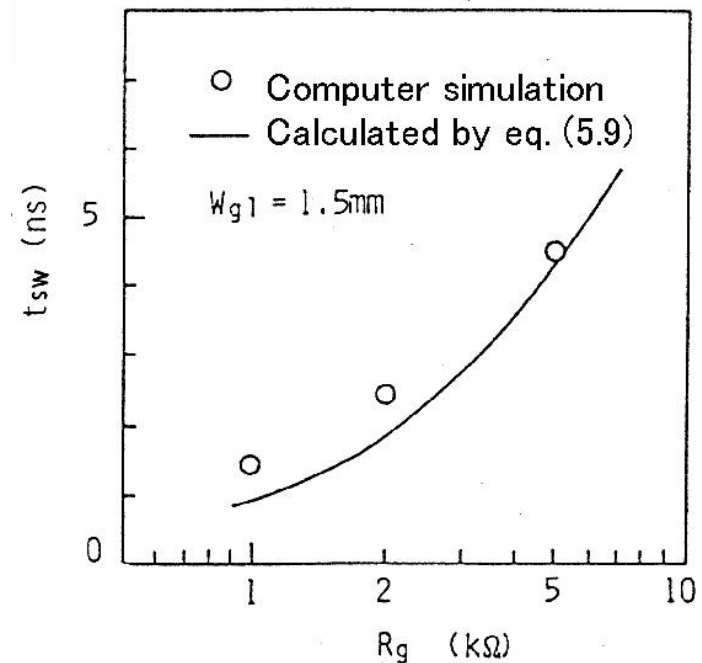
ただし比較的低い周波数でも  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ によるゲートと入出力の結合の影響があり, ゲートに接続されるバイアス回路のインピーダンスが小さいと追加の損失が発生する

# C<sub>gs</sub>, C<sub>gd</sub>による挿入損失増加と切替時間

- ゲート電流は流れないので、直列ゲートバイアス抵抗  $R_g$  を大きくすることで損失の増加を防ぐことができるが、 $(C_{gs} + C_{gd})$  と  $R_g$  のつくる時定数により、切替時間が多少長くなる



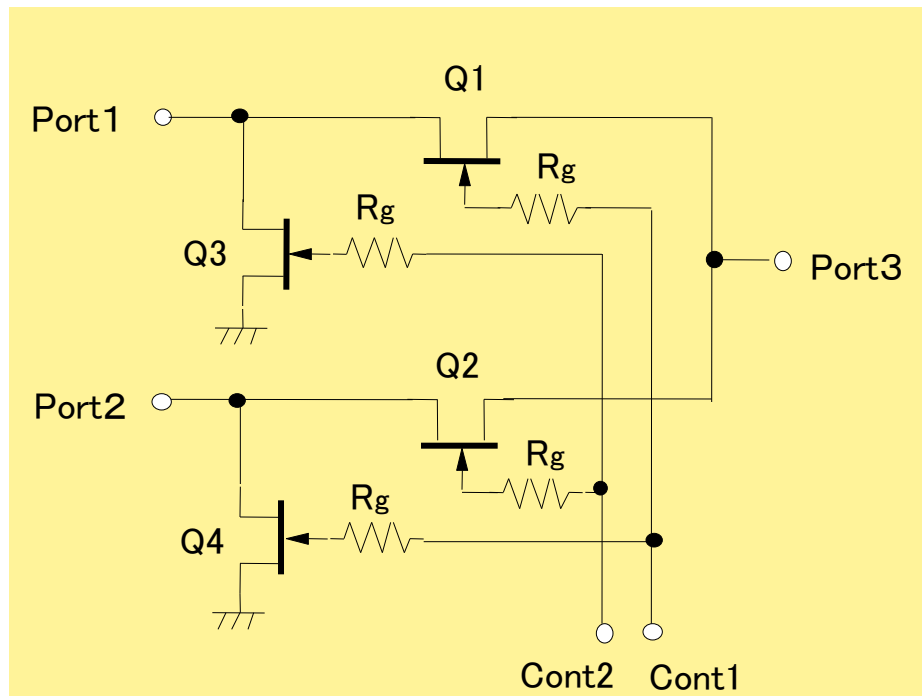
ゲートバイアス抵抗値と挿入損失の関係  
(SPDTスイッチ)



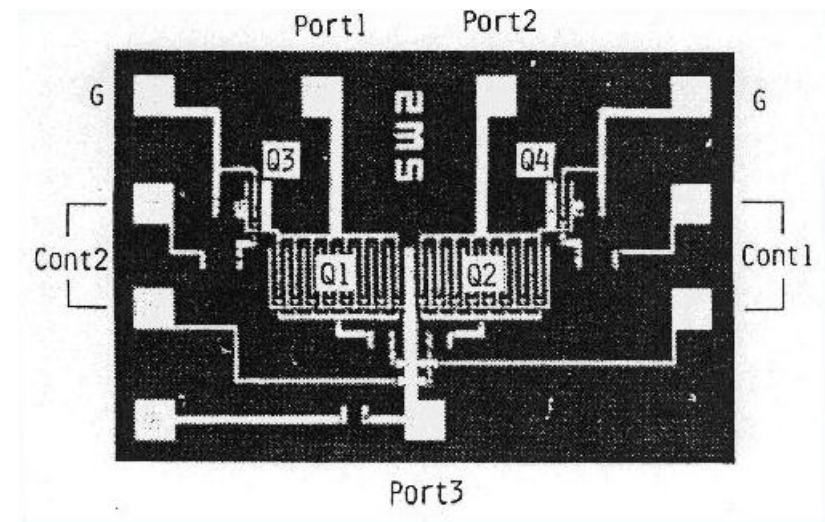
ゲートバイアス抵抗値と切替時間の関係

# 無反射型SPDTスイッチ

- SPDT (Single-Pole-Double-Throw) スイッチでは, OFF状態のポートがオープンとなるが, 利用法によってはOFF状態のポートを終端させることが好ましい場合がある → 無反射型SPDTスイッチ



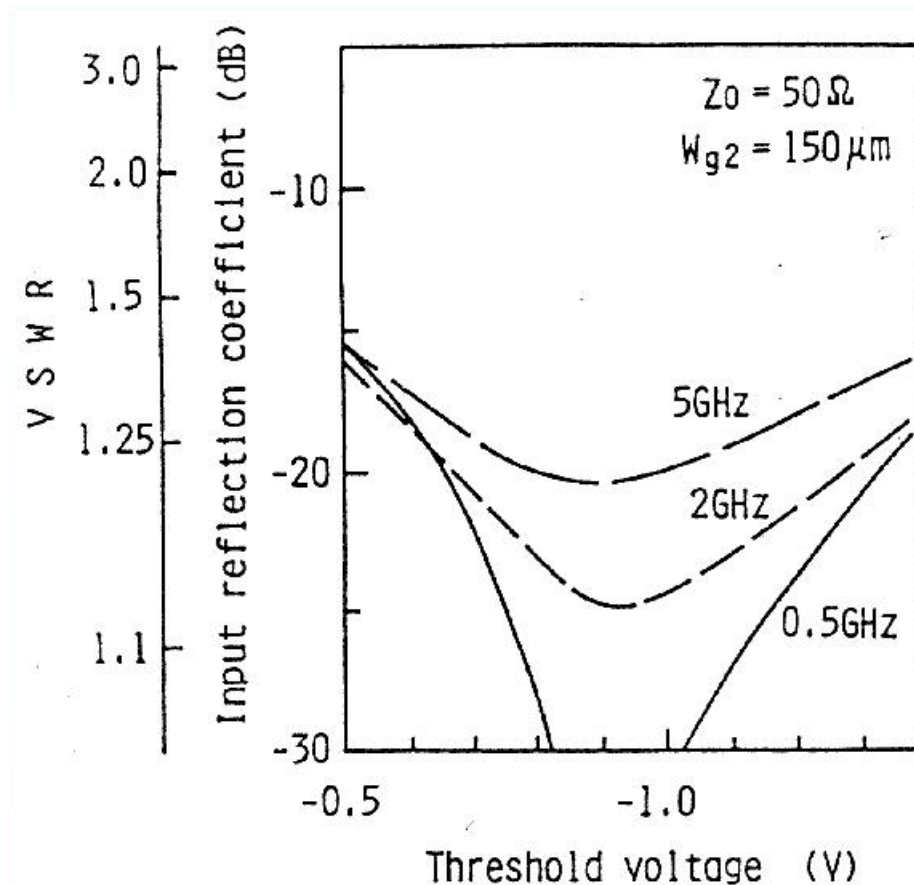
Q3, Q4が終端用FET ( $R_{on} = 50 \Omega$ )



GaAs MES FET IC による無反射型  
SPDTスイッチ (チップサイズ  $0.9 \times 1.3 \text{ mm}$ )  
(山尾他、1984)

ゲート幅  $W_{g1,2} = 1.5 \text{ mm}$   $W_{g3,4} = 150 \mu\text{m}$   
オン抵抗  $7.5 \Omega \cdot \text{mm}$  (ゲート長  $1 \mu\text{m}$ )

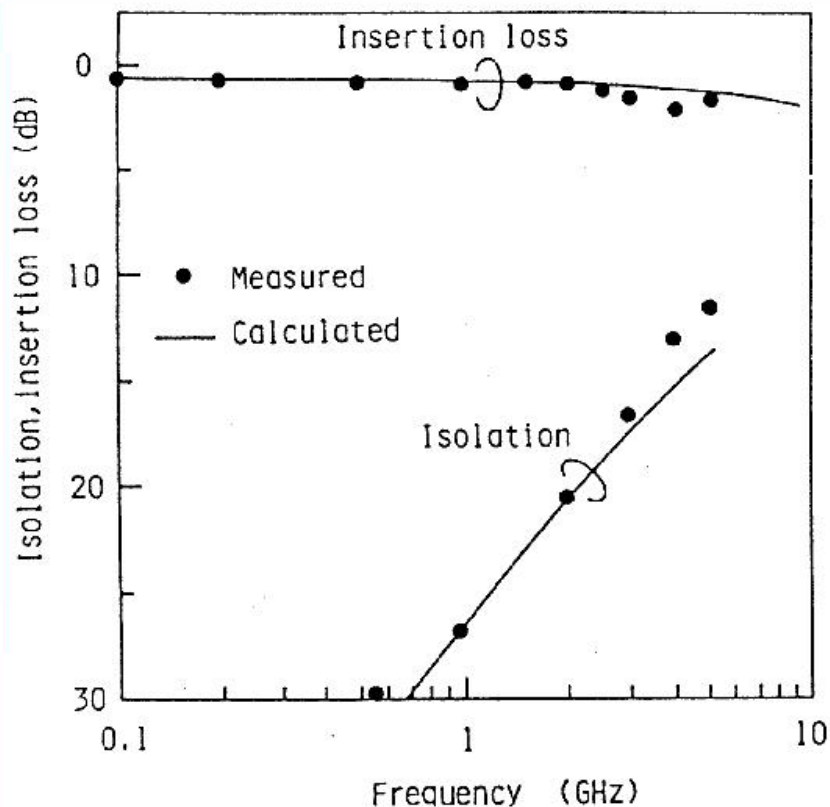
# 終端用FETの50Ω終端特性



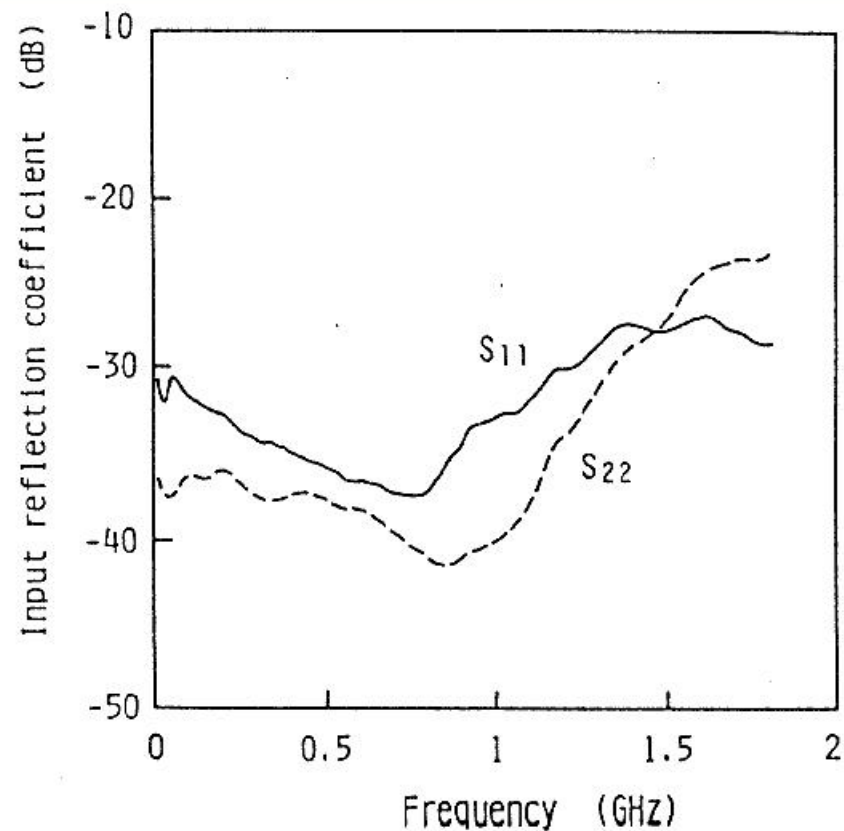
オン状態のFETは理想的な抵抗素子と等化ではないが、そう高くない周波数では、抵抗にかなり近い特性を得ることができる

# SPDTスイッチICの特性(1)

## 挿入損失とアイソレーション



## 入出力整合特性

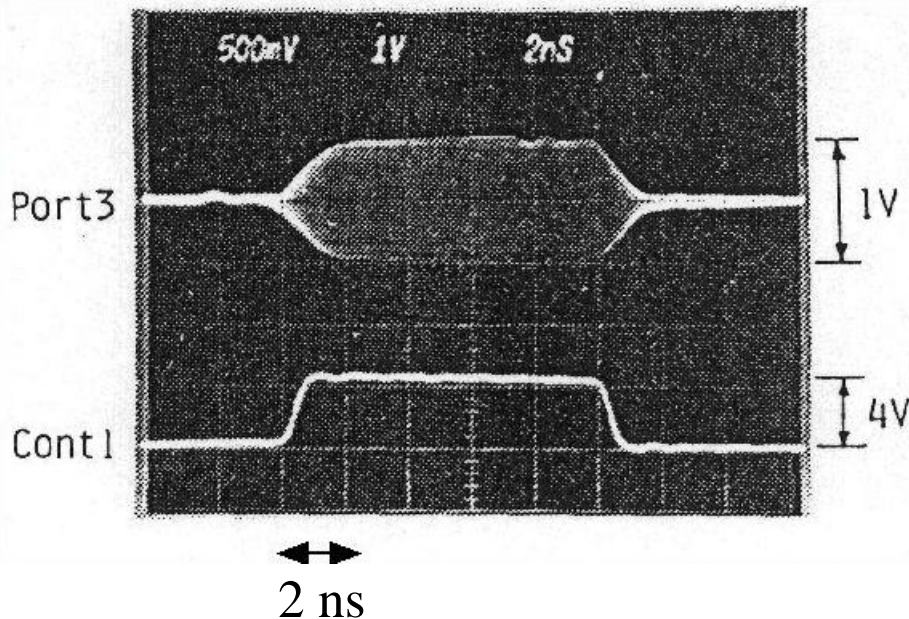


アイソレーションは  $C_{ds}$  が50オーム線路に挿入されたものとして計算した結果によく一致する



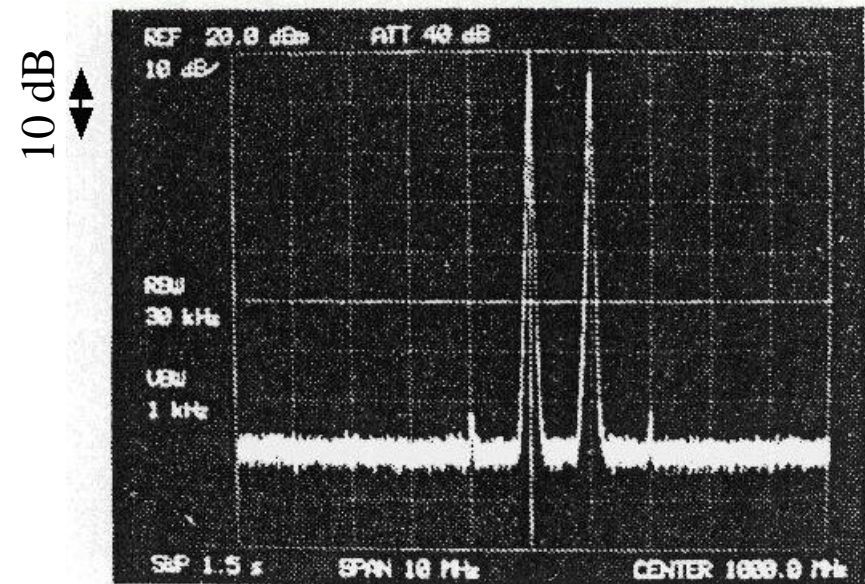
# SPDTスイッチICの特性(2)

## 切替時間波形



切替時間は、 $R_g = 2 \text{ k}\Omega$  の場合  
2 ns であり、設計値に近い

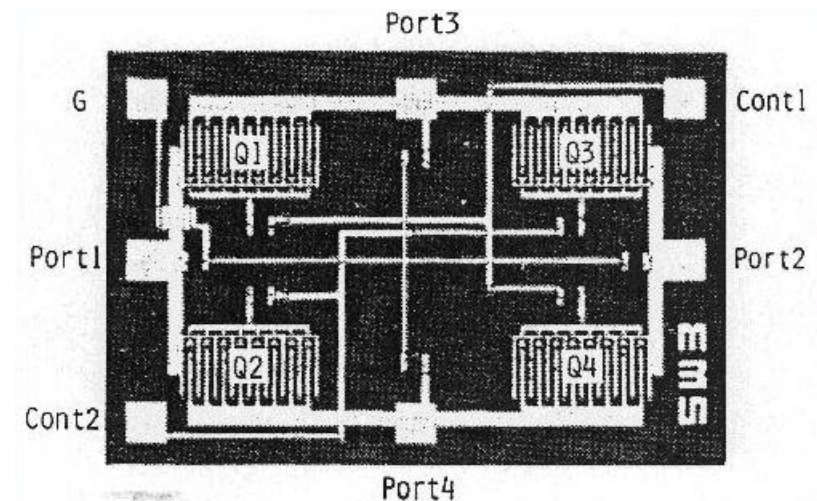
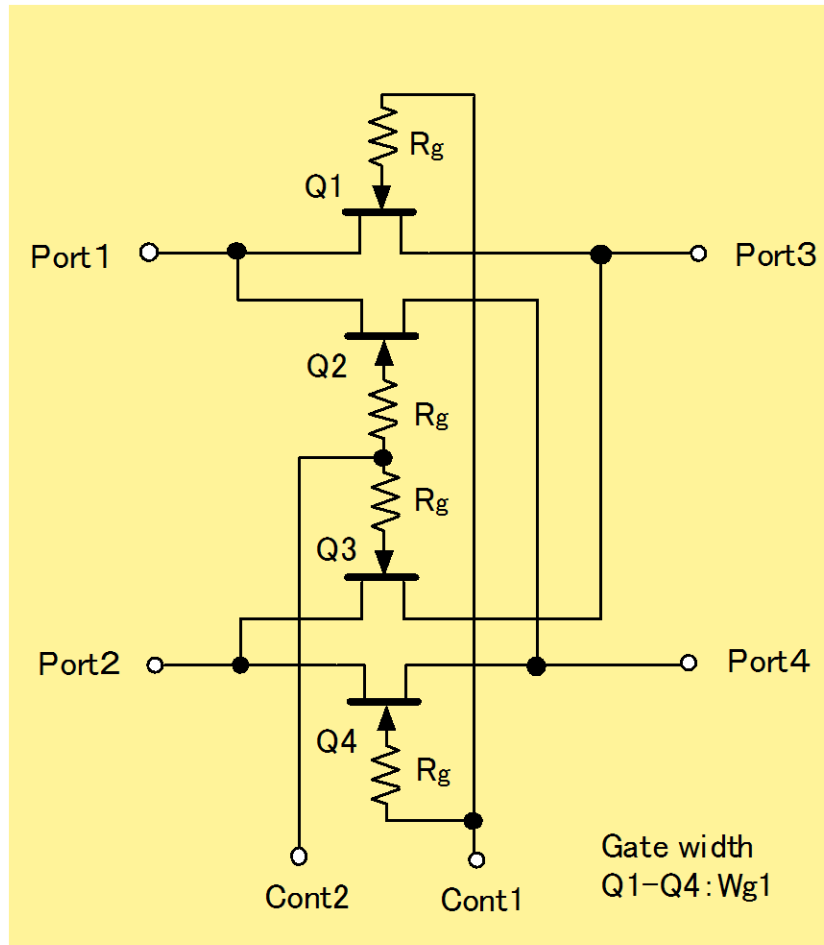
## 2信号入力時の相互変調歪み特性



入力信号電力 +20 dBm (17 dBm x 2)  
において、IM歪みは -68 dB 以下

# DPDTスイッチ

- DPDT(Double-Pole-Double-Throw)スイッチは2x2のマトリクススイッチ



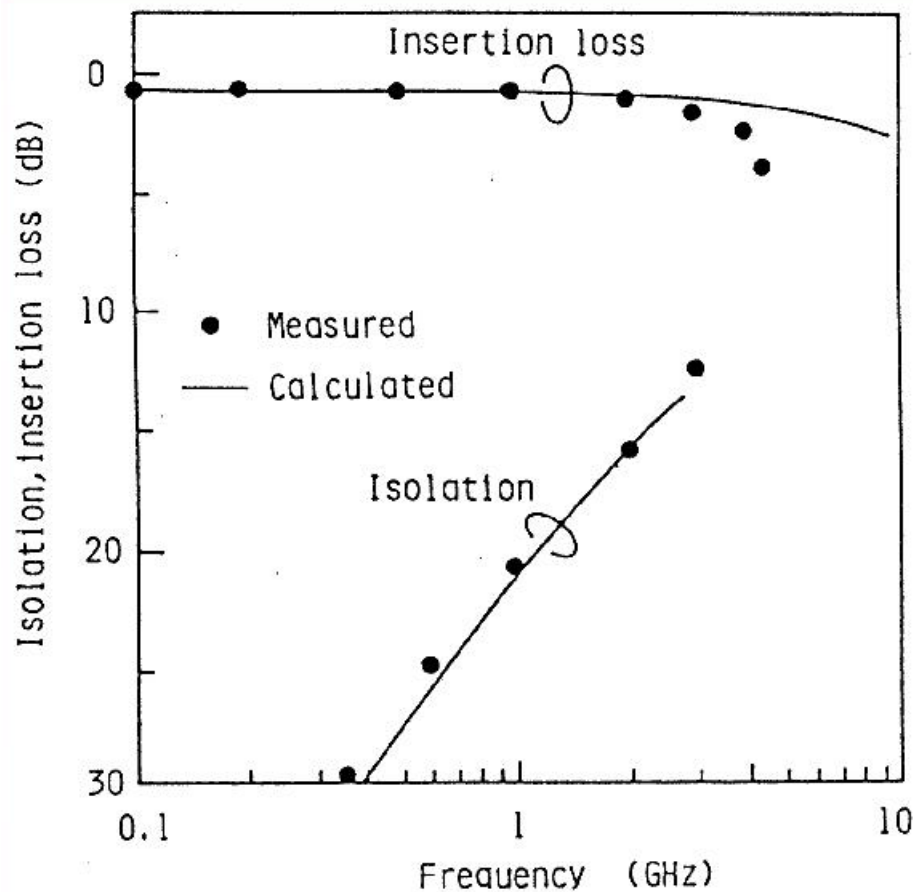
GaAs MES FET IC による  
DPDTスイッチ(チップサイズ 0.9 x 1.3 mm)  
(山尾他、1984)

ゲート幅  $W_{g1,2,3,4} = 1.5\text{mm}$

オン抵抗  $7.5 \Omega \cdot \text{mm}$  (ゲート長  $1\mu\text{m}$ )

# DPDTスイッチの特性

- STDTスイッチと比べて高い周波数での損失が大きく、アイソレーションも劣化している



DPDTスイッチでは  
マトリクス構成のため  
 $C_{ds}$ による結合損失の  
起こる経路が増える

経路1 Port1  $\rightarrow$   $C_{dg1}$   $\rightarrow$  Port3

経路2 Port1  $\rightarrow$  Port4  $\rightarrow$   $C_{dg4}$   
 $\rightarrow$  Port2  $\rightarrow$  Port3



# RF-MEMS

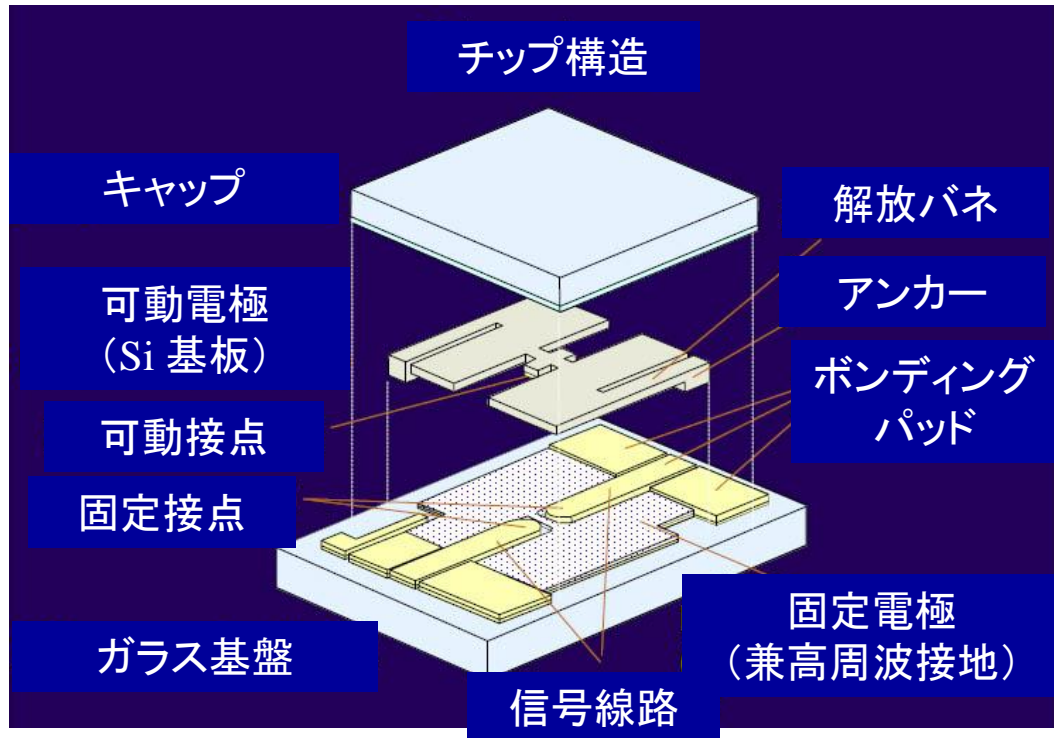
- MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) は半導体微細加工技術を利用して、ウェハ上に微小な機械動作素子を構成したデバイスである
- MEMSをRF回路素子として用いた例
  - ① RFスイッチ
  - ② 可変コンデンサ
  - ③ 可変インダクタンス

いずれも電極を可動とする
- MEMSのメリット
  - ① **空間を利用**することで、半導体基板による損失やインピーダンス低下の影響を受けずに回路設計ができる
  - ② 半導体 (FETやダイオード) が有する**非線形特性から解放**される  
→ 大きな電力を扱える

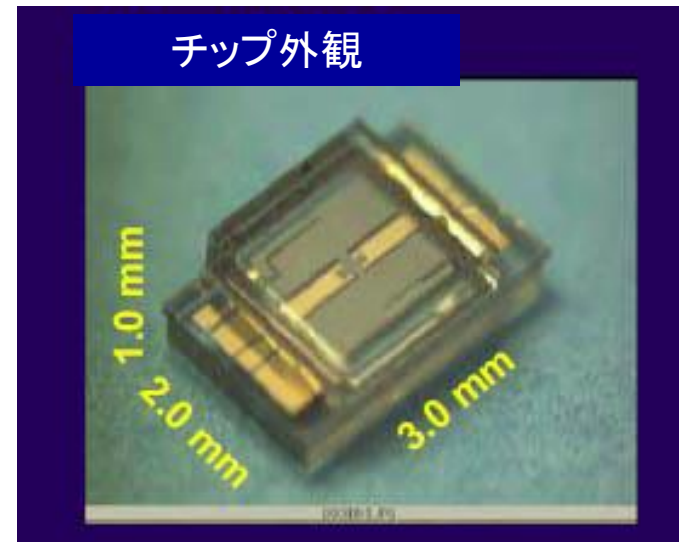
# MEMS RFスイッチ

- バネの性質を有する電極を静電力により吸引・反発することで、オン・オフ動作するものが多い
- 電極が直流接続するものと、容量を介して接続するものがある
  - ① DC接点型； 金属電極どうしがコンタクト
  - ② 容量接点型； 誘電体（ポリシリコンなど）をはさんでコンタクト
    - ①は低オン抵抗のものが実現できるが、接点の信頼度が課題
    - ②は10GHz程度以上の周波数帯で使用可能
- 実用上の課題
  - 信頼性
  - 制御電圧発生回路との一体化
  - コスト

# 直流接点型RF-MEMSスイッチの例



構造図



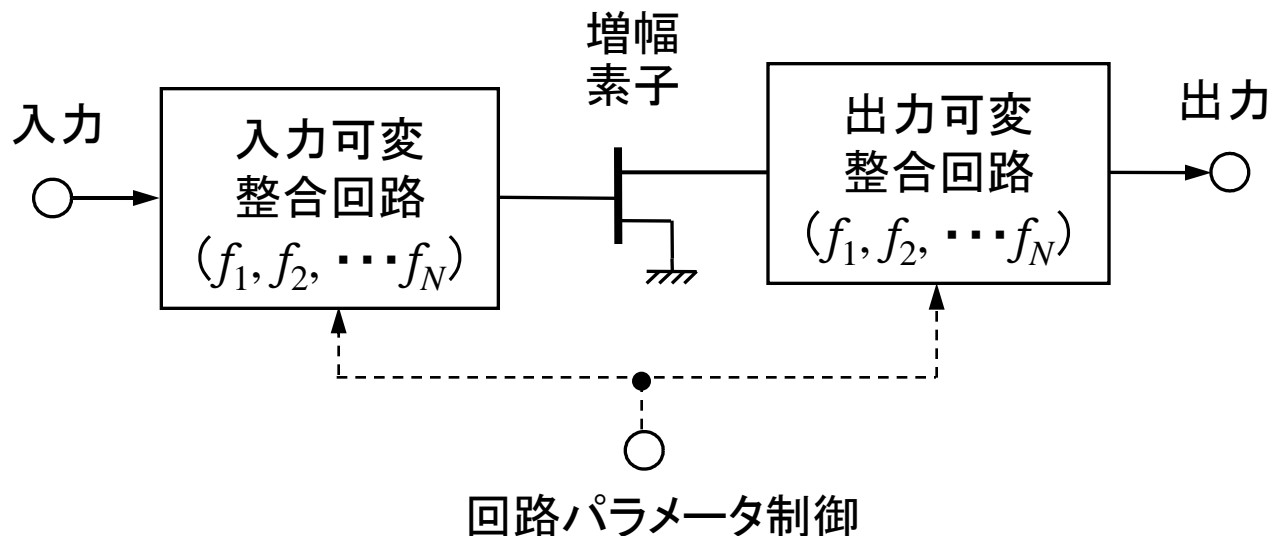
写真

(図面提供;オムロン社)

オン抵抗;  $0.4 \sim 0.5 \Omega$ , アイソレーション; 40 dB以上 (DC~4GHz)  
 駆動電圧; 20V

# RF-MEMSスイッチを用いたマルチバンド電力増幅器

## ● 可変整合回路によるマルチバンド化の基本構成

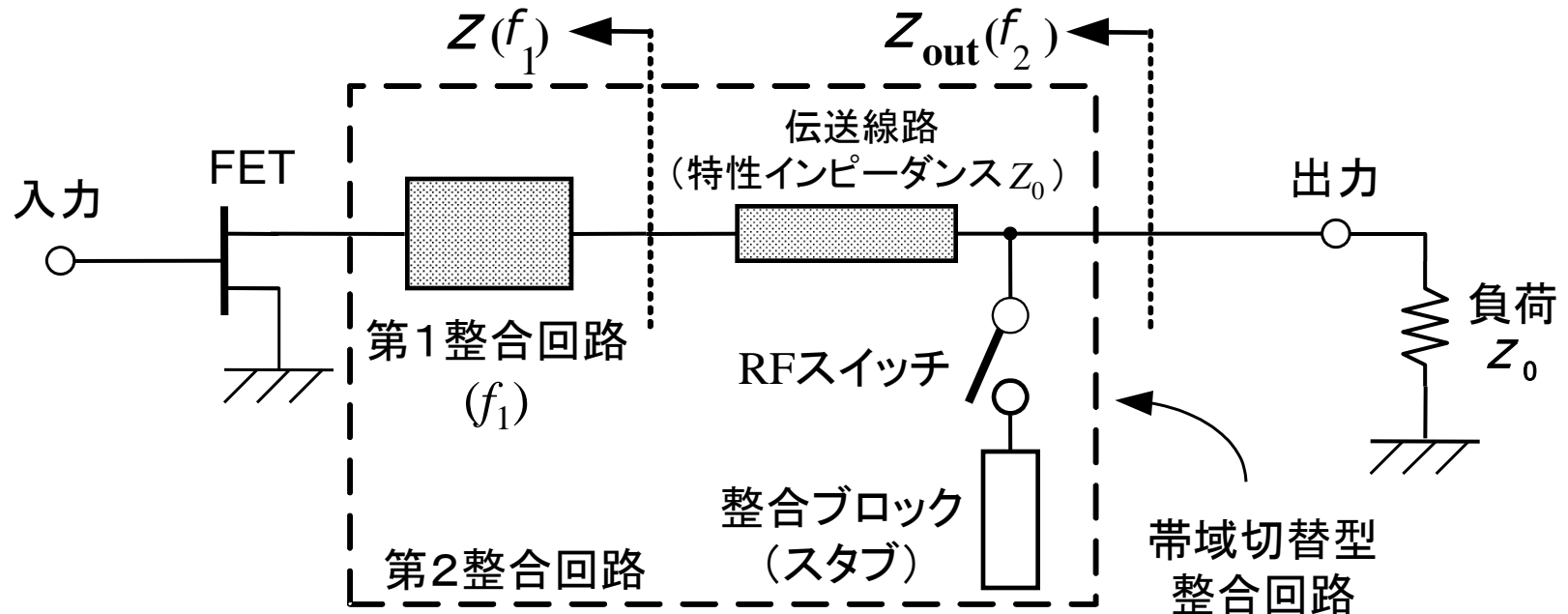


増幅素子そのものは本来広帯域の特性を有する



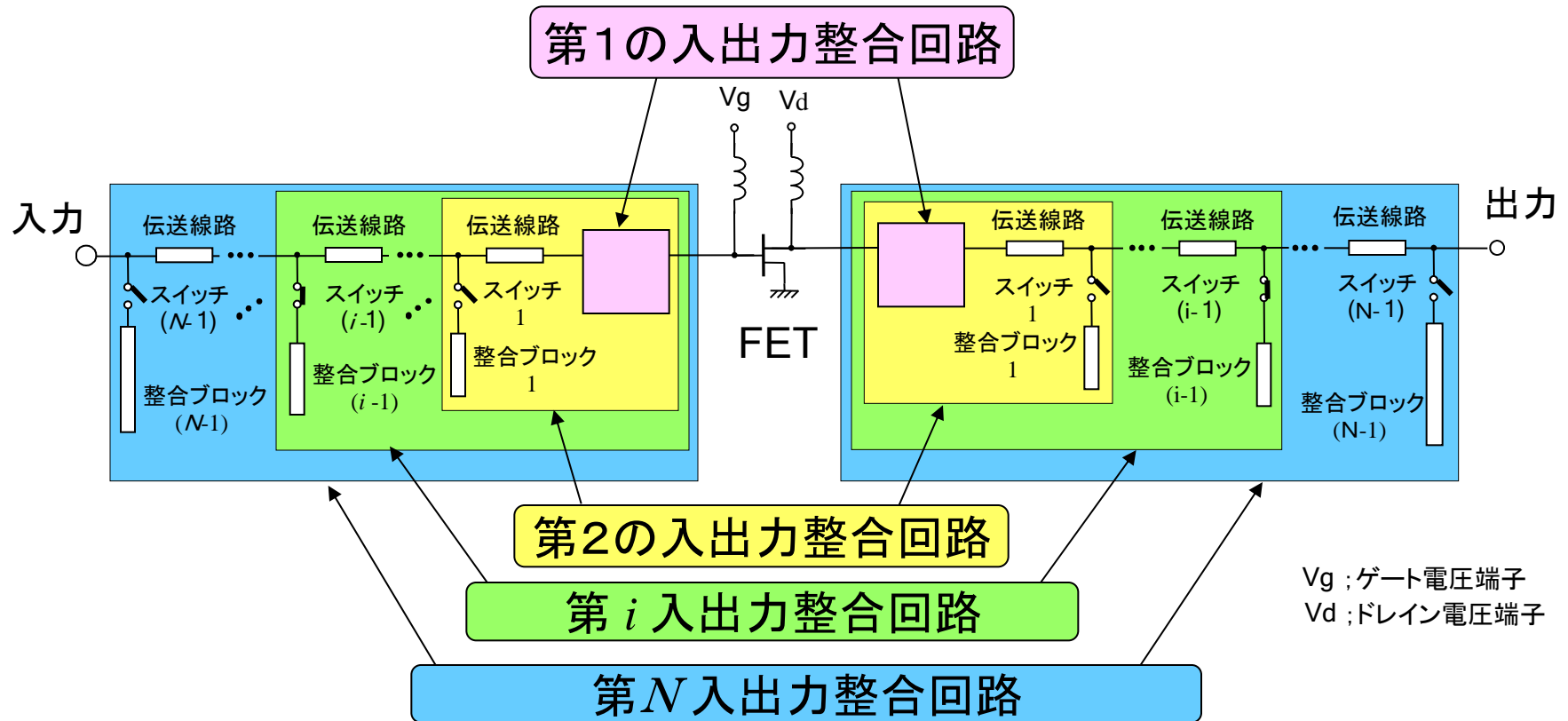
入出力整合回路で回路の動作周波数を変更可能

## RFスイッチによる帯域切替型整合回路

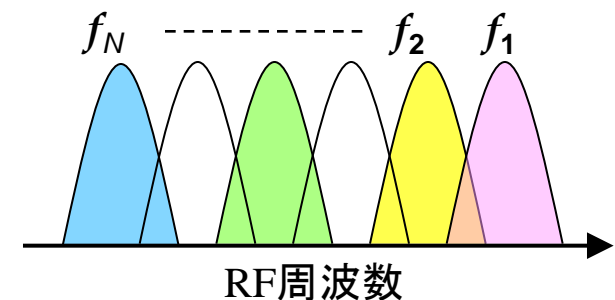


最も高い周波数  $f_1$  の整合回路の外側に付加回路を接続することで、第2の周波数  $f_2$  で整合

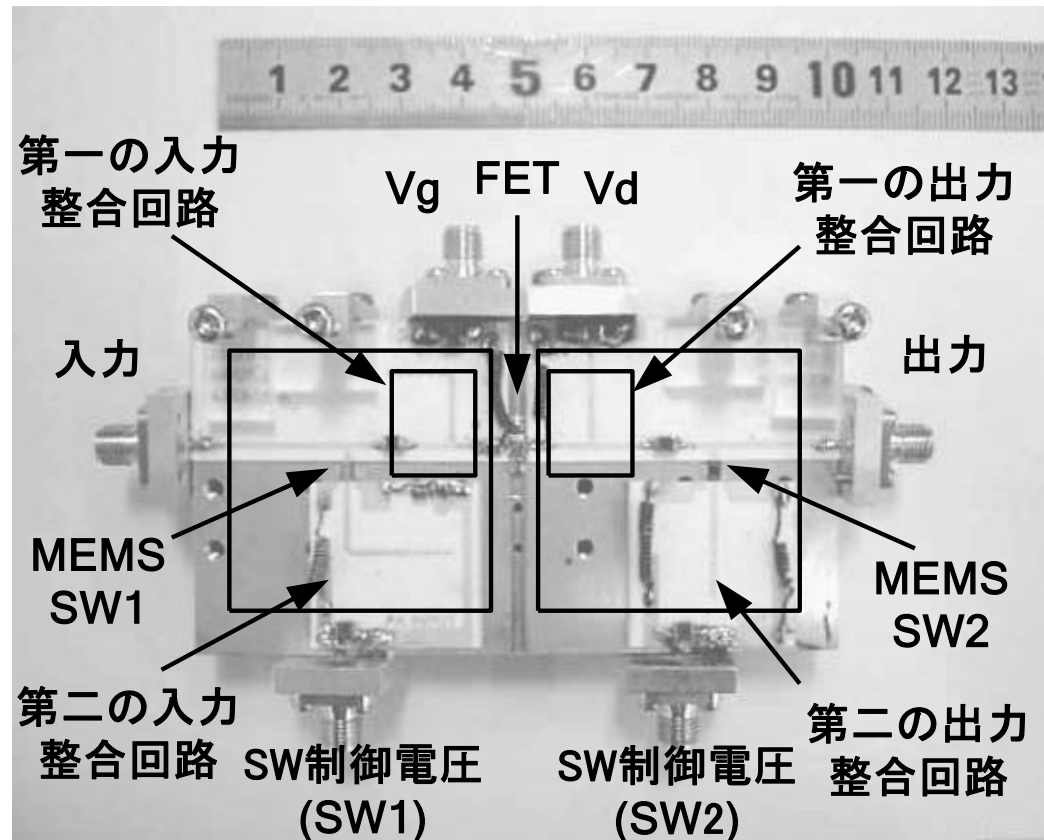
# 帯域切替型整合回路によるマルチバンド増幅回路



最も高い周波数  $f_1$  の整合回路の外側に付加回路を追加接続することで、複数の周波数で整合  
5~9バンド動作も実証済み

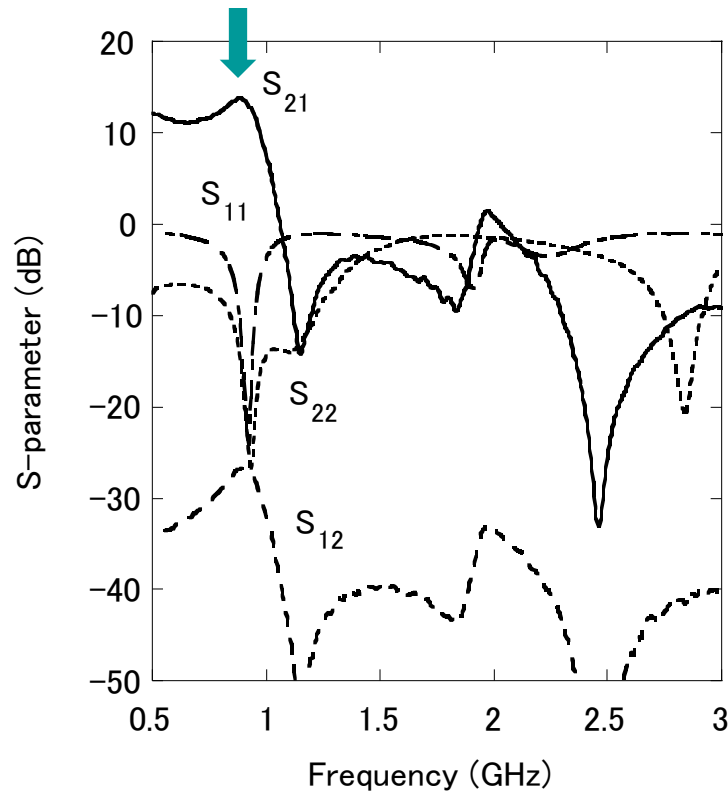


# 900 MHz/1900 MHz帯デュアルバンドPA(2004)

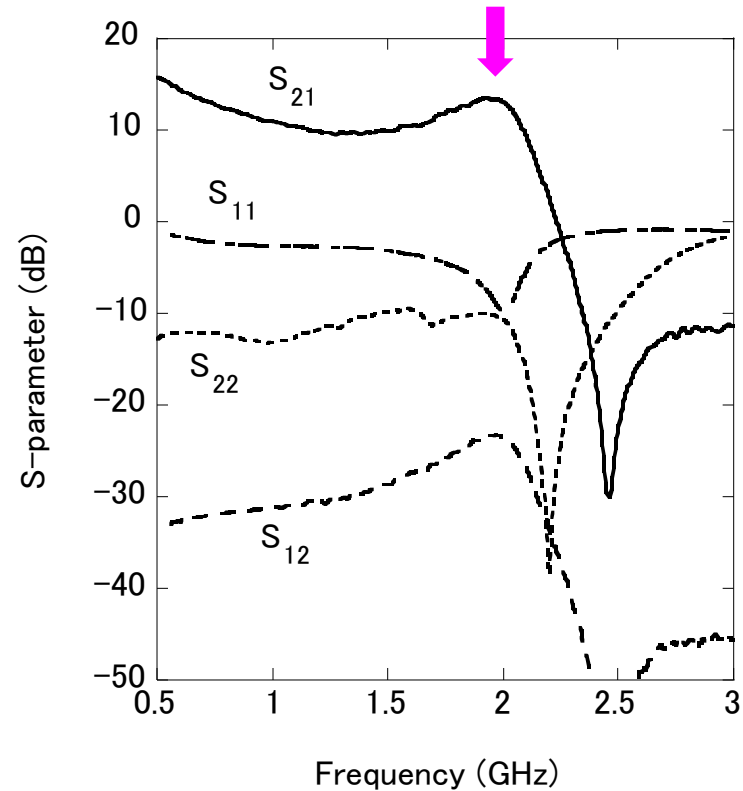


Fukuda, H. Okazaki, T. Hirota, and Y. Yamao, "Novel 900 MHz/1.9 GHz dual-mode power amplifier employing MEMS switches for optimum matching," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Volume: 14 , Issue: 3.

# 小信号Sパラメータの周波数特性



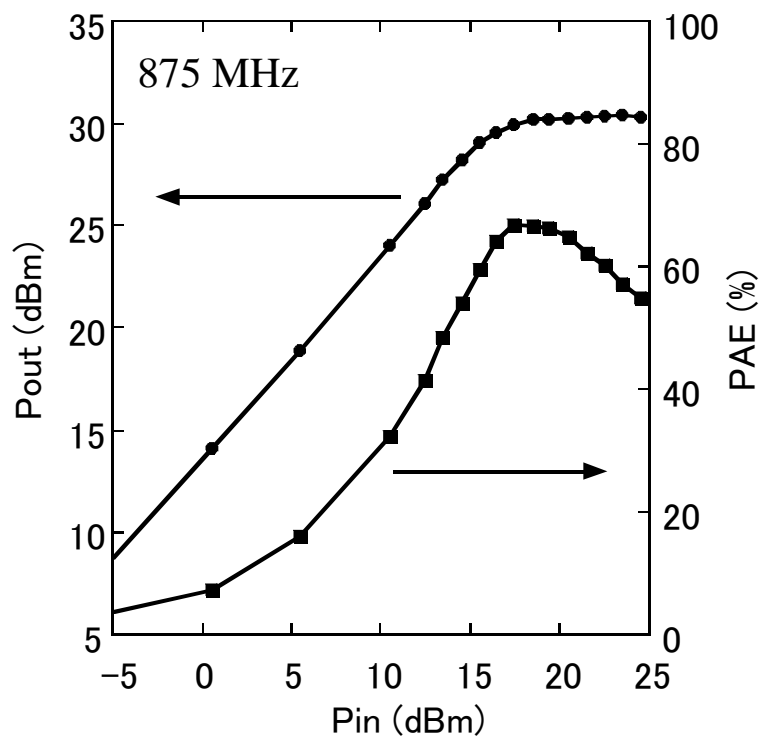
(a) スイッチオン



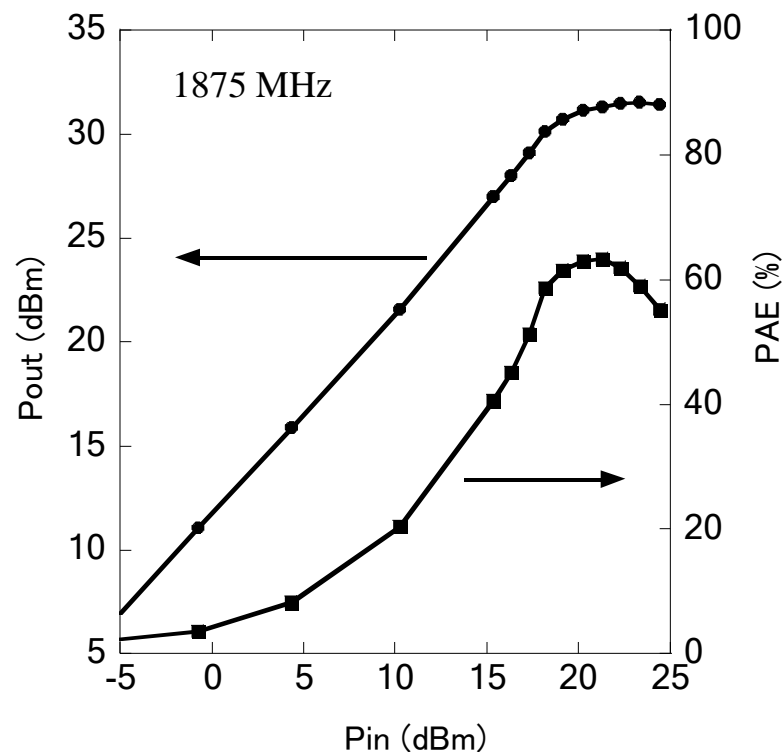
(b) スイッチオフ



# 入出力特性と電力付加効率



(a) スイッチオン(875 MHz)



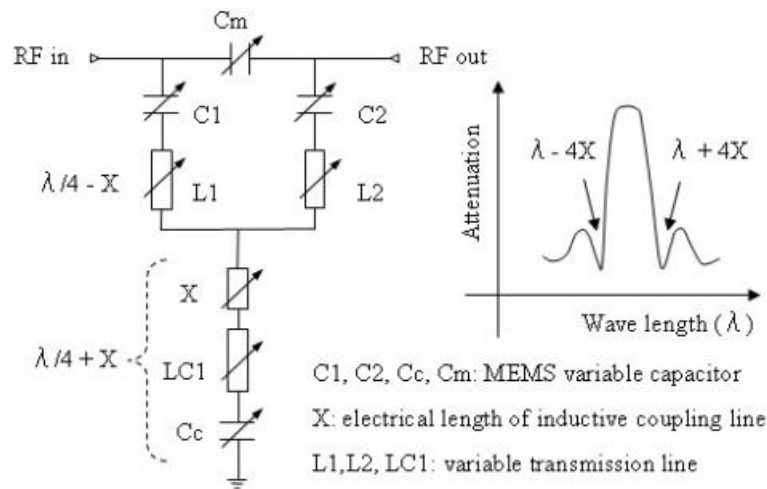
(b) スイッチオフ(1875 MHz)

いずれの周波数においても高い電力付加効率と  
1W(30 dBm)以上の最大出力を得られる

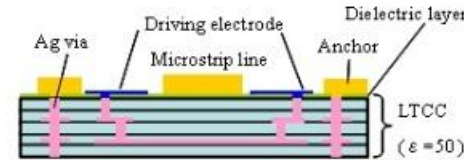
# デュアルバンドPAの特性

周波数帯 (中心周波数)	Low (875 MHz)	High (1875 MHz)
帯域幅 (PAE>60%)	850-920 MHz	1860-1935 MHz
小信号利得 (dB)	13.9	12.1
PAE最大値 (%)	67	63
PAE最大時利得 (dB)	12.4	10.5
飽和出力 (dBm)	30.4	31.5

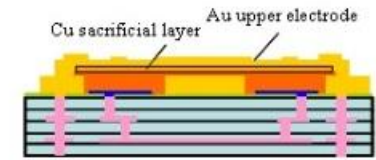
# MEMSとLTCCを集積化した可変BPF



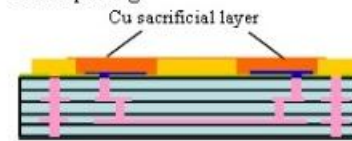
1. Formation of anchor and microstrip line



3. Formation of upper electrode by continuous electroplating (Cu and Au)



2. Formation of flat surface by Cu electroplating



4. Removal Cu sacrificial layer

