

3. RFアナログCMOSモデリング技術

青木 均

SLIDE 1

Agenda

- 周波数領域の解析とSパラメータ
Sパラメータとは
- 高精度にデバイスの高周波解析を行う為の技術
De-embedding
- BSIM3、BSIM4によるRFモデリング
- RF回路検証の重要性

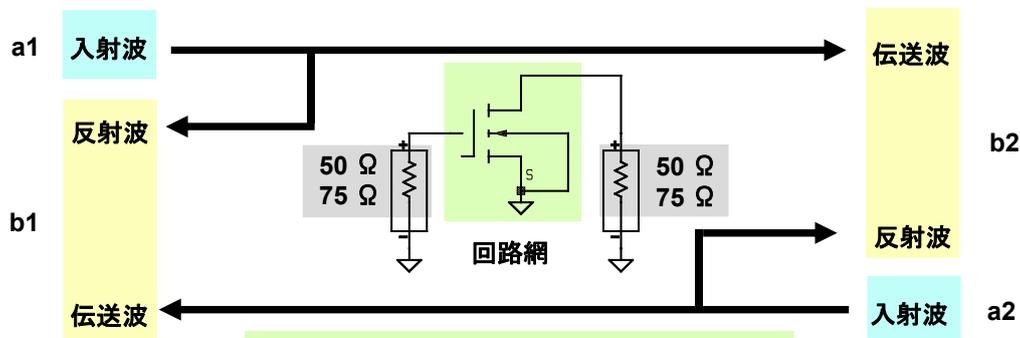


SLIDE 2

- 周波数領域における代表的なパラメータ
- YZHは開放、短絡条件のため発振しやすく測定が困難である
- 概念的に理解しやすい
- ベクトルネットワークアナライザにて測定が容易におこなえる
- パラメータ変換が容易におこなえる
- RF/ μ W BJT、MESFET、HEMTの設計、解析、評価において実績済
- Sパラメータによる効果的な抽出方法が可能
- リニアアンプ、低雑音アンプなどの設計、解析、評価に最適
- フィルタ、マッチング回路などの設計、解析、評価に最適
- 自己発熱効果の解析、評価に応用可能

Sパラメータとは？

Scattering Parameter (散乱パラメータ)



反射係数	$\Gamma = \frac{b_1}{a_1} \quad a_2 = 0$	$\Gamma = \frac{b_2}{a_2} \quad a_1 = 0$
伝送係数	$\tau = \frac{b_2}{a_1} \quad a_2 = 0$	$\tau = \frac{b_1}{a_2} \quad a_1 = 0$

S_{ij} i: 出力ポート
 j: 入力ポート

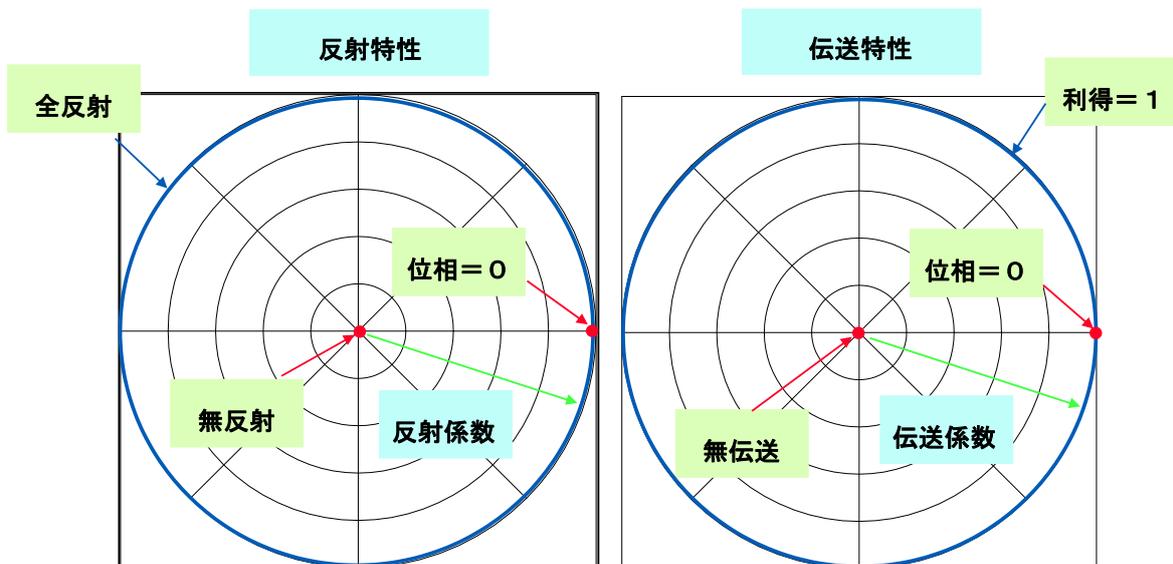
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$s_{11} = \frac{b_1}{a_1} \quad a_2 = 0$$

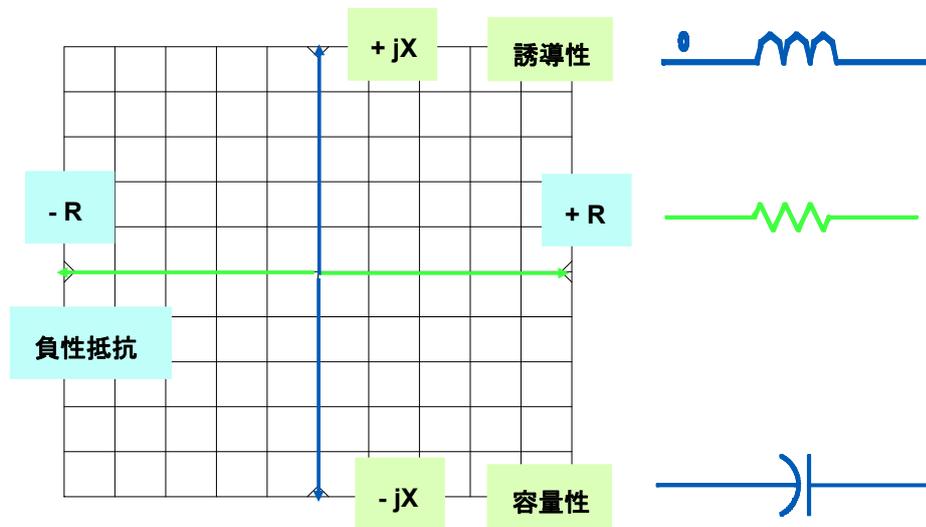
$$s_{12} = \frac{b_1}{a_2} \quad a_1 = 0$$

$$s_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad a_2 = 0$$

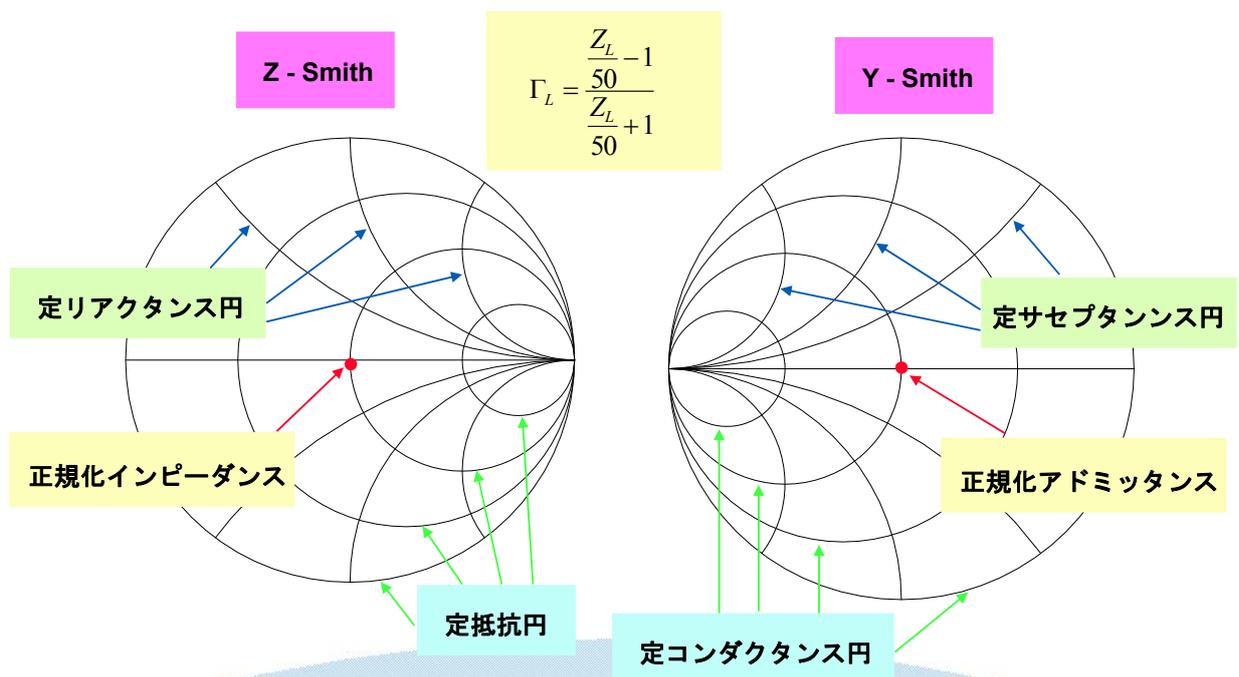
$$s_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad a_1 = 0$$



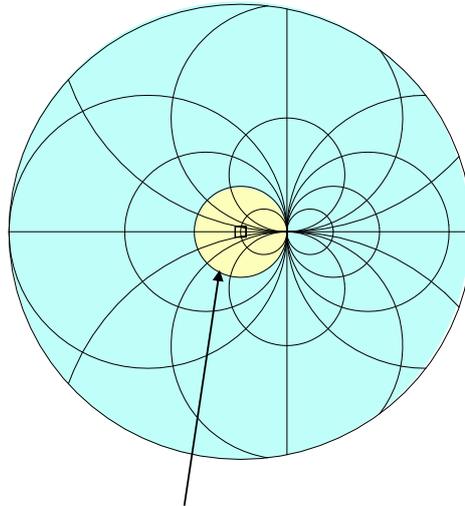
インピーダンス直交座標



スミスチャート



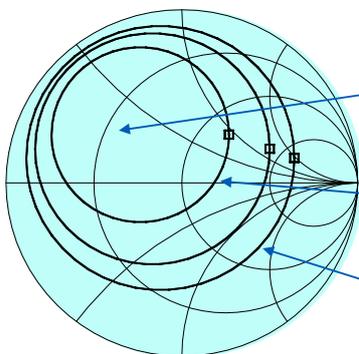
負性抵抗領域



反射係数1のスミスチャート

雑音円(NF)と電力利得円(G_A)

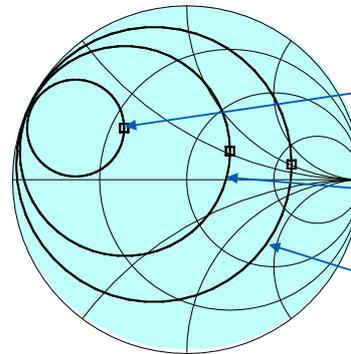
Γ_S 平面



NF=1 dB

NF=2 dB

NF=3 dB



$G_A=13$ dB

$G_A=10$ dB

$G_A=7$ dB

$$NF = F_{min} + \frac{4 \cdot R_h \cdot |\Gamma_S - \Gamma_{opt}|^2}{(1 - |\Gamma_S|^2) \cdot |1 + \Gamma_{opt}|^2}$$

$$G_A = \frac{|S_{21}|^2 \cdot (1 - |\Gamma_S|^2)}{\left(1 - \left| \frac{S_{22} - \Delta \cdot \Gamma_S}{1 - S_{11} \cdot \Gamma_S} \right|^2\right) \cdot |1 - S_{11} \cdot \Gamma_S|^2}$$

$$\Delta = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}$$

DC測定において発振した経験は？

電圧源を電流源に変更したら良かったが何故？

HP4142 / 4155 / 4156	
FET DC Curve Tracer	
GATE voltage sweep Start=-2.0 V Stop=0.0 V Linear pts.=5	DRAIN voltage sweep Start=0.0 V Stop=5.0 V Linear pts.=41

何故、DC測定なのに発振するのか？

DCパスにフェライトビーズを入れたら良かったが何故？

このデバイスを実際の回路で使用するときには大丈夫なのか？

安定円(信号源側)

Γ_S 平面

6.1 GHz

5.1 GHz

0.1 GHz

反射係数1のスミスチャート

$|S_{11}|^2 - |\Delta|^2 > 0$ の場合
安定円の外側が絶対安定領域

$$\left| \Gamma_S - \frac{(S_{11} - S_{22}^* \cdot \Delta)^*}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right| = \left| \frac{S_{12} S_{21}}{|S_{11}|^2 - |\Delta|^2} \right|$$

$$\Delta = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}$$

Sパラメータから求められる他の一般的なパラメータ

定在波比

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}$$

リターンロス

$$RL = -20 \cdot \log_{10}(|S_{11}|)$$

入カインピーダンス

$$Z_{IN} = Z_o \cdot \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

群遅延

$$Group\ Delay = - \frac{d \cdot \text{phaserad}(S_{21})}{d\omega}$$

SLIDE 13

Sパラメータを測定する測定器

ベクトルネットワークアナライザ (VNA)



SLIDE 14

Probe Station



針の先端まで50オームを実現

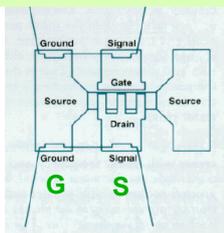
Cascade Microtech Inc.提供による



高周波用プローブ

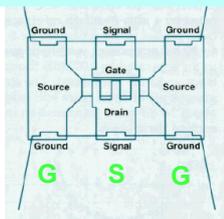


GS (Ground - Signal) タイプ



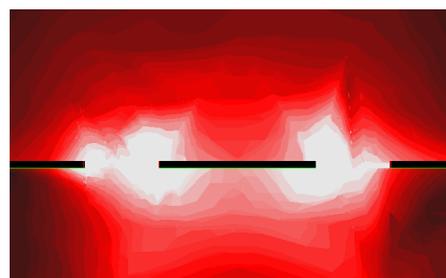
2 導体線路構造

GSG (Ground - Signal - Ground) タイプ



コプレーナ線路構造

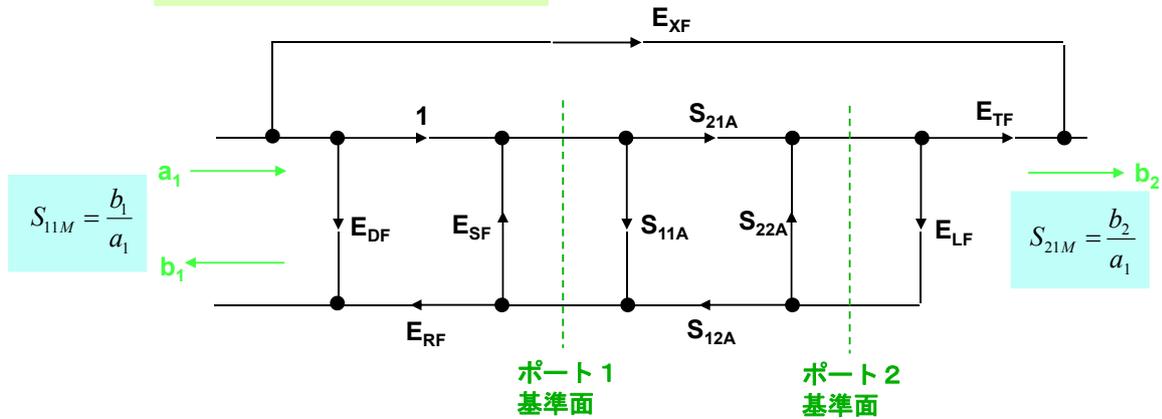
コプレーナ線路の電磁界解析例



この他には、SGS、GSGSG、SSGなどが用意

システムに内在するベクトル誤差要因

順方向シグナルフローグラフ



$$S_{11M} = \frac{b_1}{a_1}$$

$$S_{21M} = \frac{b_2}{a_1}$$

- E_{DF} : 方向性による誤差
- E_{SF} : ソースマッチによる誤差
- E_{RF} : 反射のトラッキングによる誤差
- E_{XF} : アイソレーションによる誤差
- E_{LF} : ロードマッチによる誤差
- E_{TF} : 伝送のトラッキングによる誤差

逆方向についても同様の誤差が存在するので合計12タームの誤差

2ポートキャリブレーションの種類

SOLT (Short-Open-Load-Thru)

----- 伝統的なキャリブレーション

TRL (Thru-Reflect-Line)

----- 導波管、高周波のマイクロストリップ系での標準的なキャリブレーション

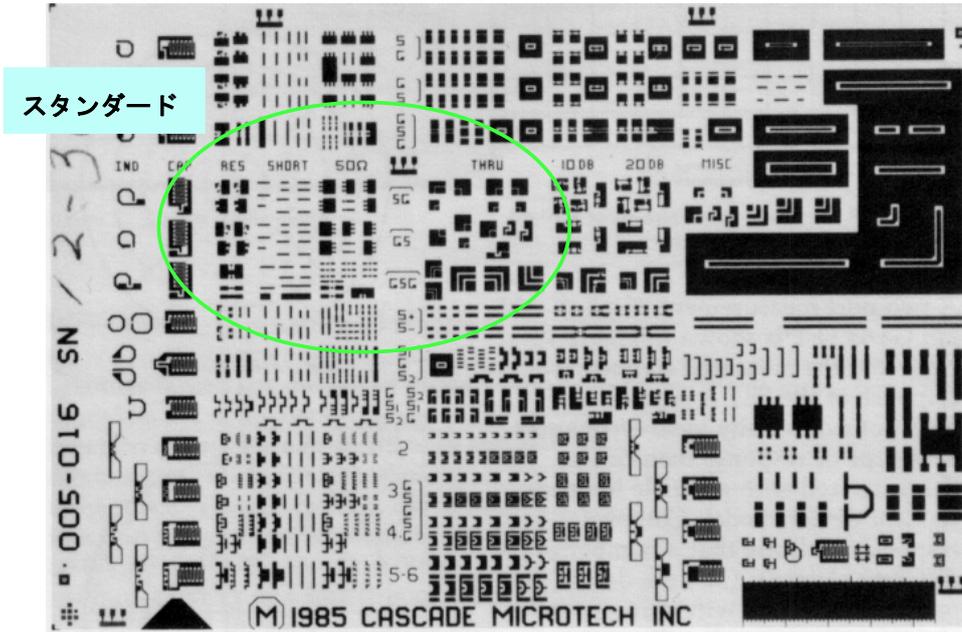
LRM (Line-Reflect-Match)

高周波のウェハ測定 of 標準的なキャリブレーション

LRRM (Line-Reflect-Reflect-Match)

TRL on Silicon

----- シリコン基板上でのキャリブレーション

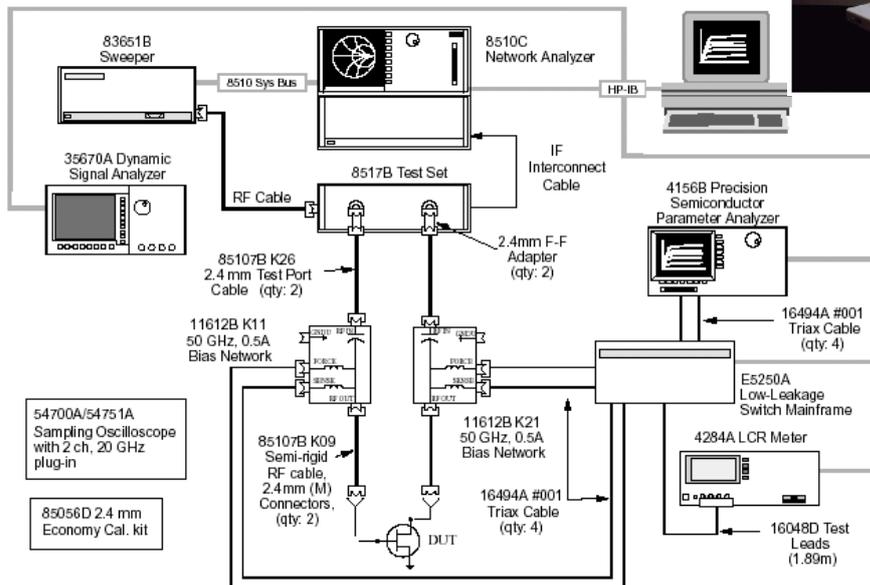


スタンダード

Cascade Microtech Inc.提供による

SLIDE 19

抽出システムの一例

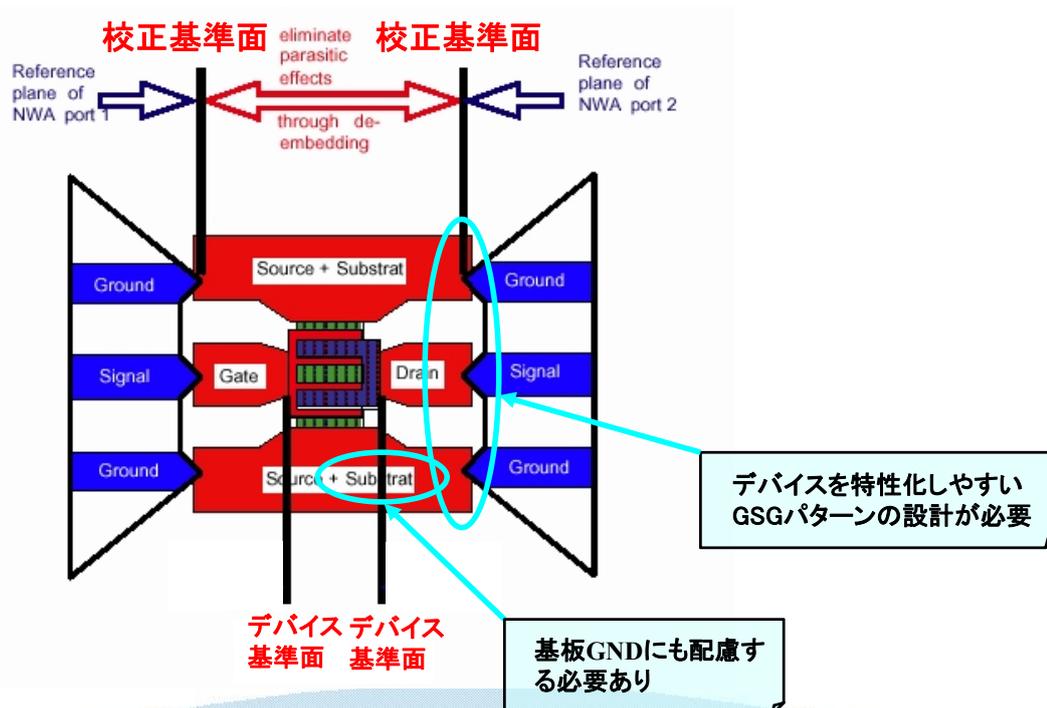


SLIDE 20

- 周波数領域の解析とSパラメータ
Sパラメータとは
- 高精度にデバイスの高周波解析を行う為の技術
De-embedding
- BSIM3、BSIM4によるRFモデリング
- RF回路検証の重要性



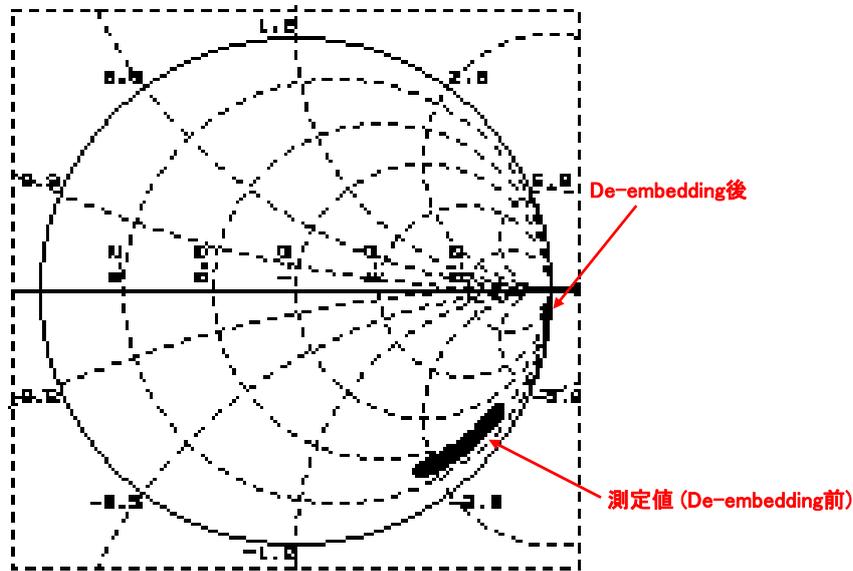
RF測定用に使われるTEGの一例



De-embeddingとは?



L=0.18um、W=20um
周波数: 3GHz-6GHz

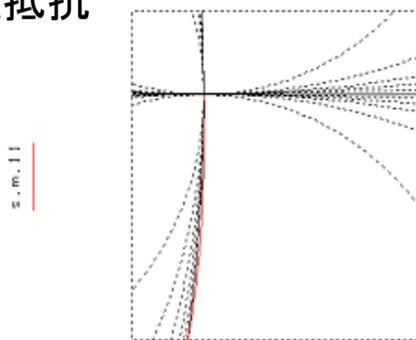


SLIDE 23

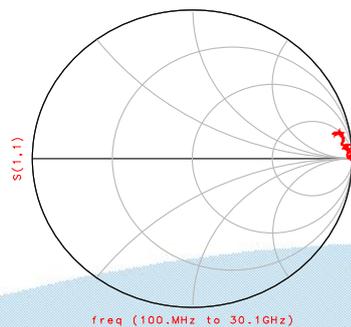
De-embeddingの難しさ



■ 負性抵抗



■ 過剰de-embedding_{freq}

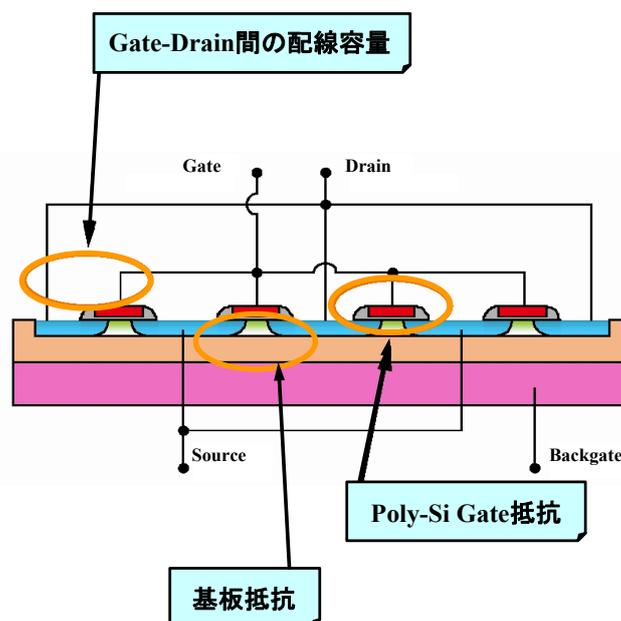


SLIDE 24

- 周波数領域の解析とSパラメータ
Sパラメータとは
- 高精度にデバイスの高周波解析を行う為の技術
De-embedding
- **BSIM3、BSIM4によるRFモデリング**
- RF回路検証の重要性



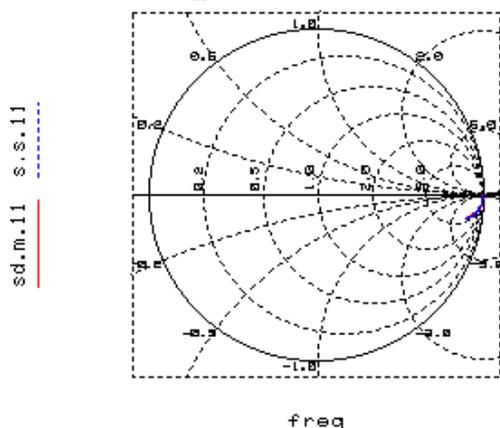
BSIM3 RFモデリングにおいて考慮すべき問題点



BSIM3 RF入力反射特性(ゲート抵抗の有無)

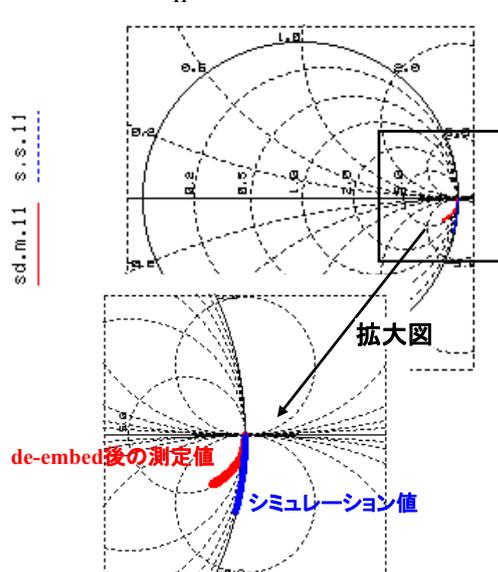
周波数: 100MHz - 20.1GHz
 Gate : 1.5 V固定
 Drain : 1, 1.25, 1.5 V

S₁₁特性(ゲート抵抗有り)



— de-embed後の測定値
 - - - シミュレーション値

S₁₁特性(ゲート抵抗無し)

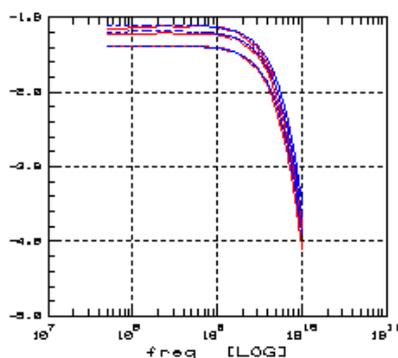


— de-embed後の測定値
 - - - シミュレーション値

BSIM3 RF伝送特性(ゲート抵抗の有無)

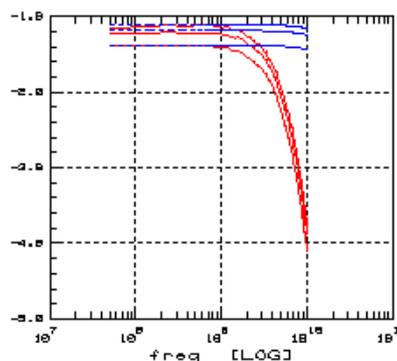
周波数: 100MHz - 20.1GHz
 Gate : 1.5 V固定
 Drain : 1, 1.25, 1.5 V

S₂₁振幅特性(ゲート抵抗有り)



— de-embed後の測定値
 - - - シミュレーション値

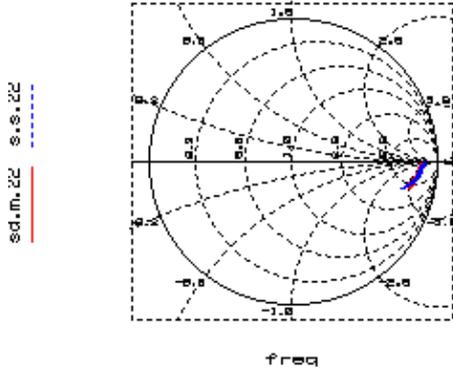
S₂₁振幅特性(ゲート抵抗無し)



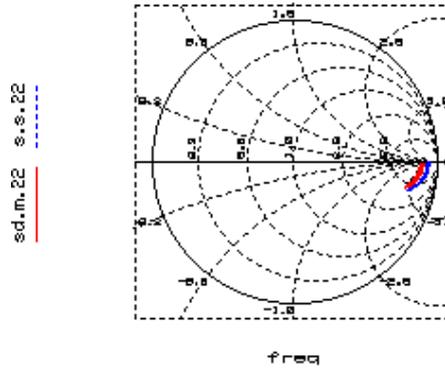
BSIM3 RF出力反射特性(基板抵抗の有無)

周波数: 100MHz - 20.1GHz
 Gate : 1.5 V固定
 Drain : 1, 1.25, 1.5 V

S₂₂特性(基板抵抗有り)



S₂₂特性(基板抵抗無し)



———— de-embed後の測定値

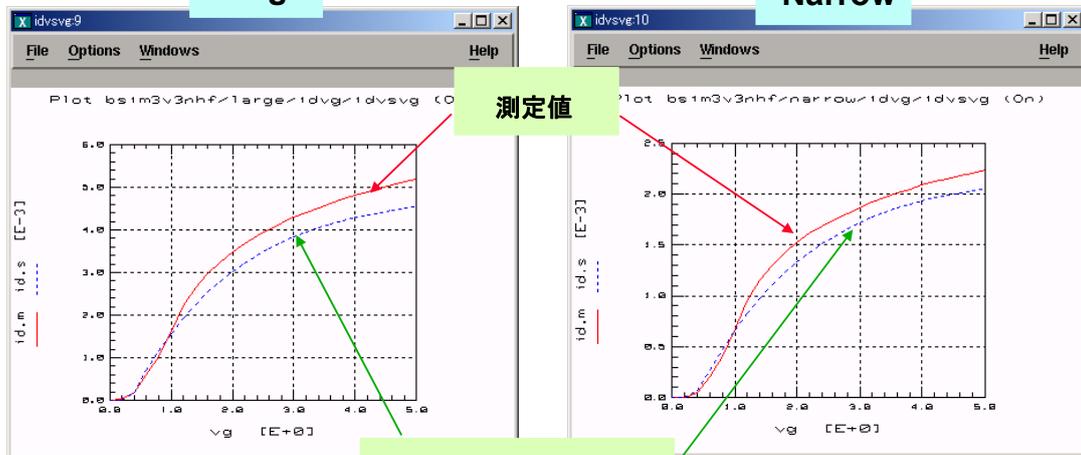
----- シミュレーション値

Large/Narrowのidvg特性

Vg=0-5V , Vb=Vs=0V , Vd=0.1V

Large

Narrow



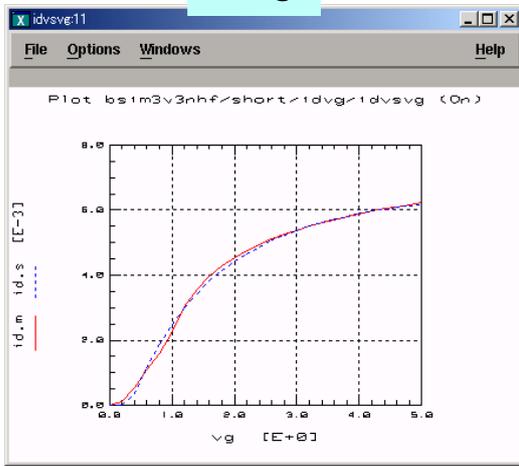
シミュレーション値

Shortのidvg/gm_vs_vg特性

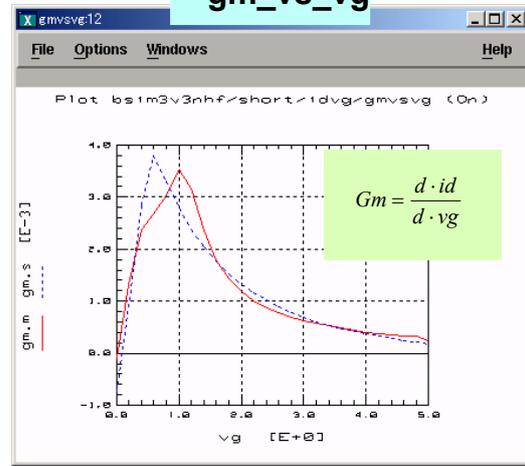


Vg=0-5V , Vb=Vs=0V , Vd=0.1V

idvg



gm_vs_vg

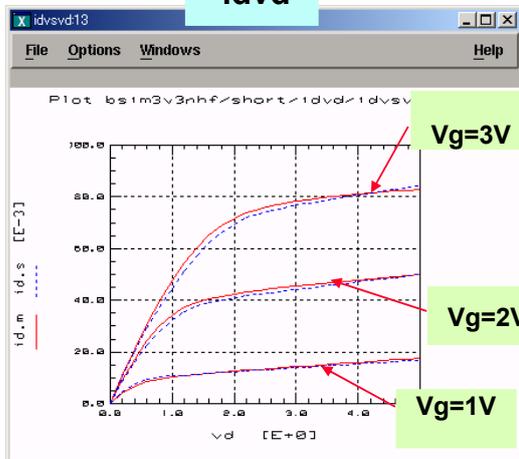


Shortのidvd/rout_vs_vd特性

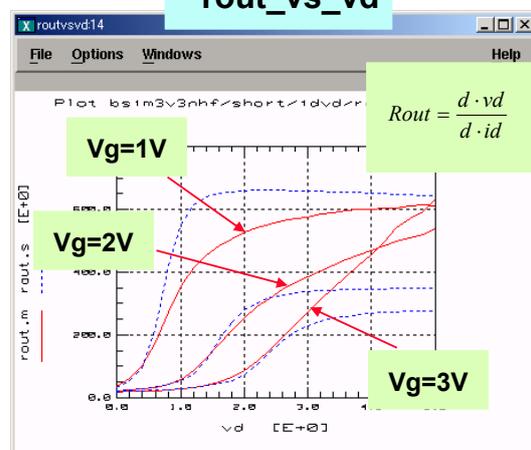


Vg=1-3V , Vb=Vs=0V , Vd=0-5V

idvd



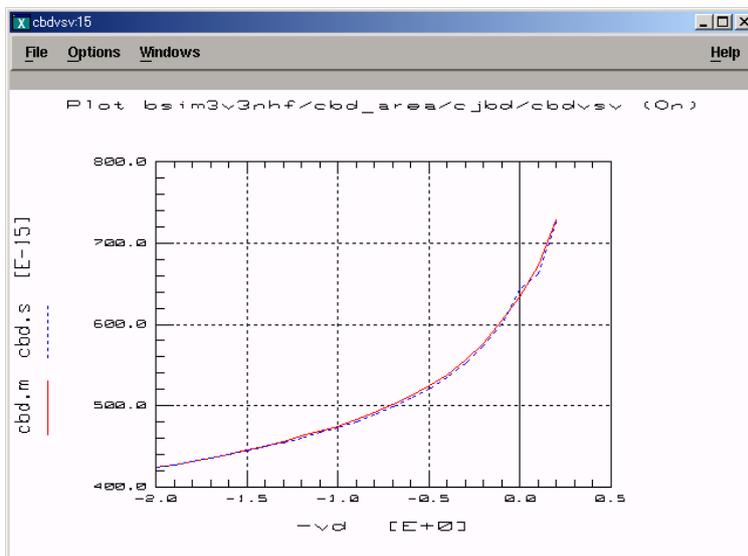
rout_vs_vd



接合容量特性



Vg=Vb=Vs=0V , Vd=-0.2~2V , Freq=350MHz

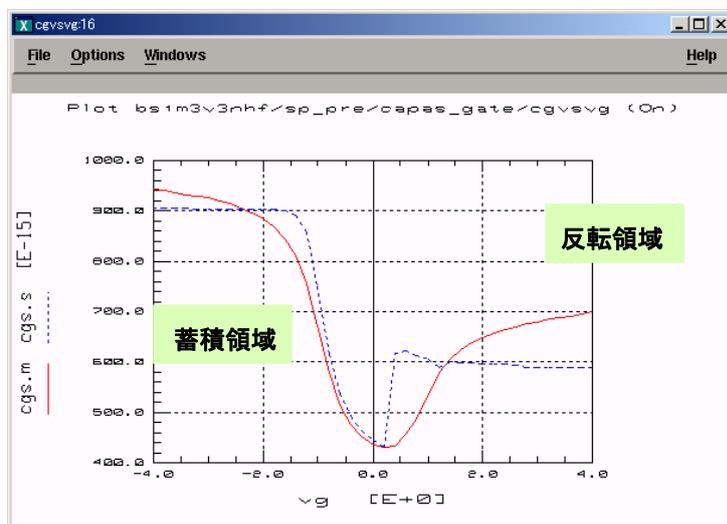


SLIDE 33

ゲートソース間容量特性



Vd=Vb=Vs=0V , Vg=-4~4V , Freq=350MHz

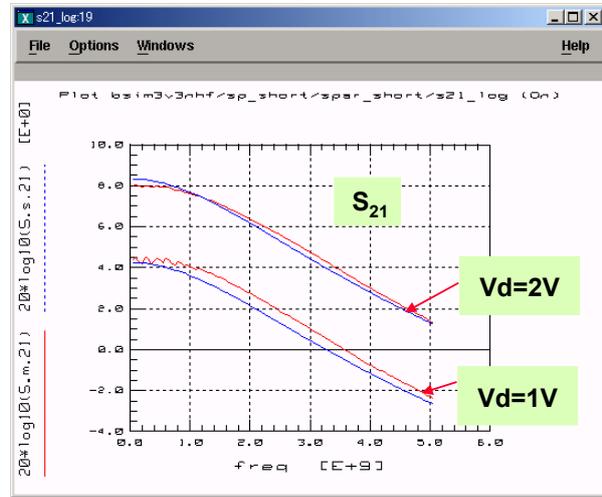
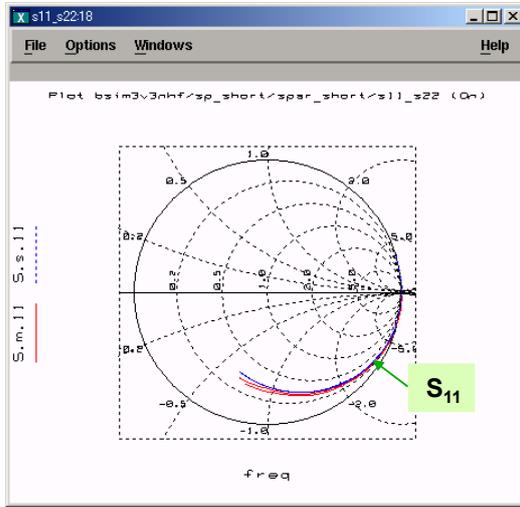


SLIDE 34

ShortのSパラメータ特性



Vb=Vs=0V , Vg=1.5V , Vd=1~2V , Freq=50MHz~5.05GHz

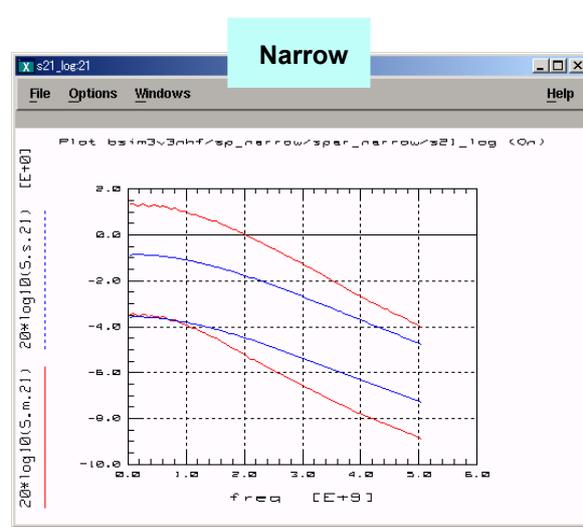
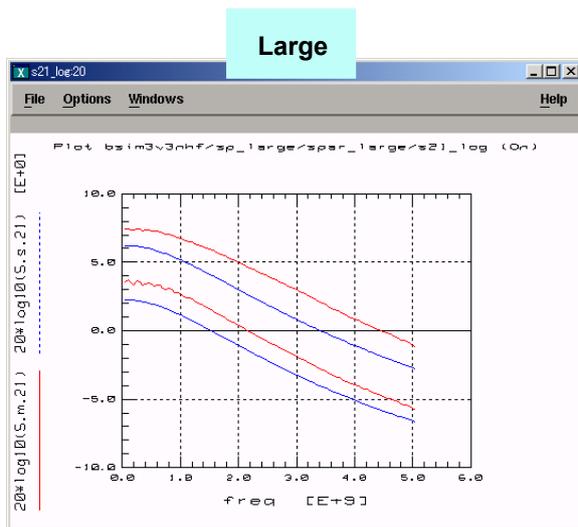


SLIDE 35

Large/NarrowのS₂₁特性



Vb=Vs=0V , Vg=1.5V , Vd=-1~2V , Freq=50MHz~5.05GHz



SLIDE 36

BSIM4ネットリスト例

デザインテクノロジーによって組み込まれたシミュレータ
 Spice3e2
 Spice3f5

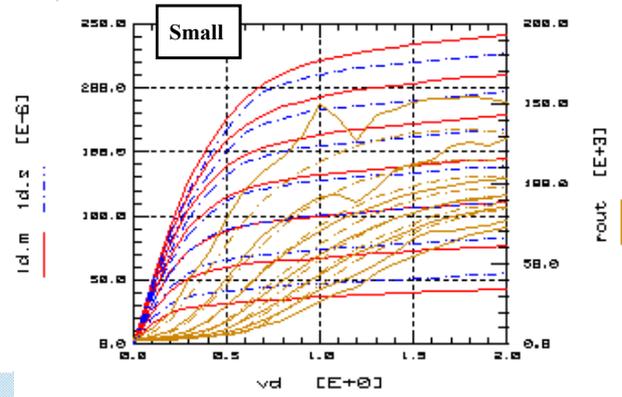
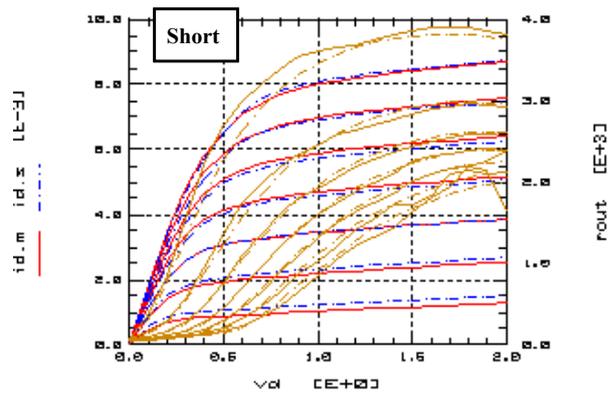
```

OPTIONS GMIN=1.0E-14
*
* Simulator: SPICE3e2
* Simulator: SPICE3f5
* Model: BSIM4.2.1
*
M1 1=D 2=G 3=S 4=B MOSMOD L=0.25u W=5u AD=5p AS=5p PD=12u PS=12u NF=1 RGEOMOD=0 GEOMOD=0
.MODEL MOSMOD NMOS LEVEL = 14 VERSION = 4.2.0 BINUNIT = 1 PARAMCHK = 1
+ MOBMOD = 1 RDSMOD = 0 IGCMOD = 0 IGBMOD = 0 CAPMOD = 2
+ RGATEMOD = 0 RBODYMOD = 0 TRNQSMOD = 0 ACNQSMOD = 0 FNOIMOD = 1
+ TNOIMOD = 0 DIOMOD = 1 PERMOD = 1 GEOMOD = 0
+
+ EPSROX = 3.9 TOXE = 3e-9 TOXP = 3e-9 TOXM = 3e-9 DTOX = 0
+ XJ = 1.5e-7 NDEP = 1.7e17 NGATE = 0 NSD = 1e20 XT = 1.55e-7
+ RSH = 0 RSHG = 0.1
+
+ VTH0 = 0.7 PHIN = 0 K1 = 0.33 K2 = -0.018 K3 = 2
+ K3B = 0 W0 = 2.5e-6 LPE0 = 1.74e-7 LPEB = 0 VBM = -3
+ DVTO = 2.2 DVT1 = 0.53 DVT2 = -0.032 DVTI0 = 0 DVTP1 = 0.001
+ DVTOV = 0 DVT1W = 5.3e6 DVT2W = -0.032 ETA0 = 0.08 ETAB = -0.07
+ DSUB = 0.56 U0 = 0.067 UA = 1e-9 UB = 1e-19 UC = -0.0465
+ EU = 1.67 VSAT = 8e4 A0 = 1 AGS = 0 B0 = 0
+ B1 = 0 KETA = -0.047 A1 = 0 A2 = 1 VOFF = -0.08
+ VOFFL = 0 MINV = 0 NFACTOR = 1 CIT = 0 CDSC = 2.4e-4
+ CDSCB = 0 CDSCD = 0 PCLM = 1.3 PDIBLC1 = 0.39 PDIBLC2 = 0.0086
+ PDIBLCB = 0 DRDOUT = 0.56 PSCBE1 = 4.24e8 PSCBE2 = 1e-5 PVAG = 0
+ DELTA = 0.01 PPRDUT = 0 PDITS = 1m PDITSL = 0 PDITSD = 0
+
+ RDSW = 200 RDSWMIN = 0 RDW = 100 RDWMIN = 0 RSW = 100
+ RSWMIN = 0 PRWG = 1 PRWB = 0 WR = 1
+
+ LINT = 0 WINT = 0 DWG = 0 DWB = 0
+ WL = 0 WLN = 1 WW = 0 WVN = 1 WWL = 0
+ LL = 0 LLN = 1 LW = 0 LWN = 1 LWL = 0
+ LLC = 0 LWC = 0 LWLC = 0 WLC = 0 WWC = 0
+ WWLC = 0
+
+ ALPHA0 = 1e-5 ALPHA1 = 0 BETA0 = 15
+
+ AGIDL = 0 BGIDL = 2.3e9 CGIDL = 0.5 EGIDL = 0.8
+
+ AIGBACC = 0.43 BIGBACC = 0.054 CIGBACC = 0.075 NIGBACC = 1 AIGBINV = 0.35
+ BIGBINV = 0.03 CIGBINV = 0.006 EIGBINV = 1.1 NIGBINV = 3 AIGC = 0.54
+ BIGC = 0.054 CIGC = 0.075 AIGSD = 0.43 BIGSD = 0.054 CIGSD = 0.075
    
```

今回使用したBSIM4の内部モデル

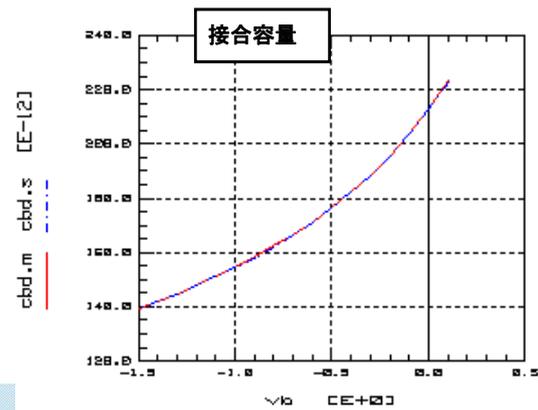
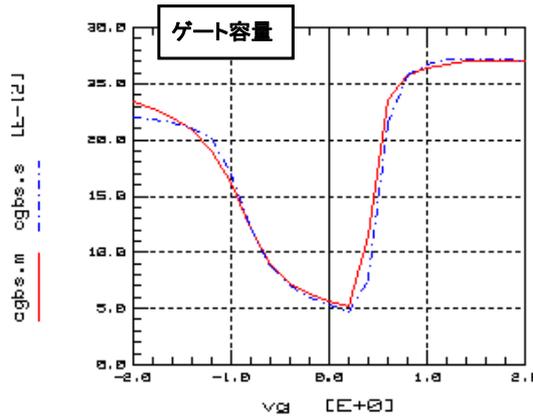
Param Name	Value	
LEVEL	14.00	
BINUNIT	1.000	
PARAMCHK	1.000	
MOBMOD	2.000	BSIM4で新しく追加されたモビリティモデル
RDSMOD	1.000	新LDD抵抗モデル
IGCMOD	0.000	ゲート漏れ電流モデルOFF
IGBMOD	0.000	
C&PMOD	2.000	新Charge Thickness Capacitanceモデル
RGATEMOD	2.000	新ジオメトリ依存型ゲート抵抗モデル
RBODYMOD	1.000	新基板抵抗モデル
TRNQSMOD	0.000	
ACNQSMOD	0.000	RGATEMODを使用するためNQSMODEL OFF
FNOIMOD	0.000	
TNOIMOD	0.000	
DIOMOD	1.000	BSIM3と同等のダイオードモデル
PERMOD	1.000	新ジオメトリ依存型Perimeterモデル
GEOMOD	0.000	デバイスに対応したジオメトリ構造
RGEOMOD	1.000	拡散抵抗モデルON

BSIM4のモデリング例(DC特性)



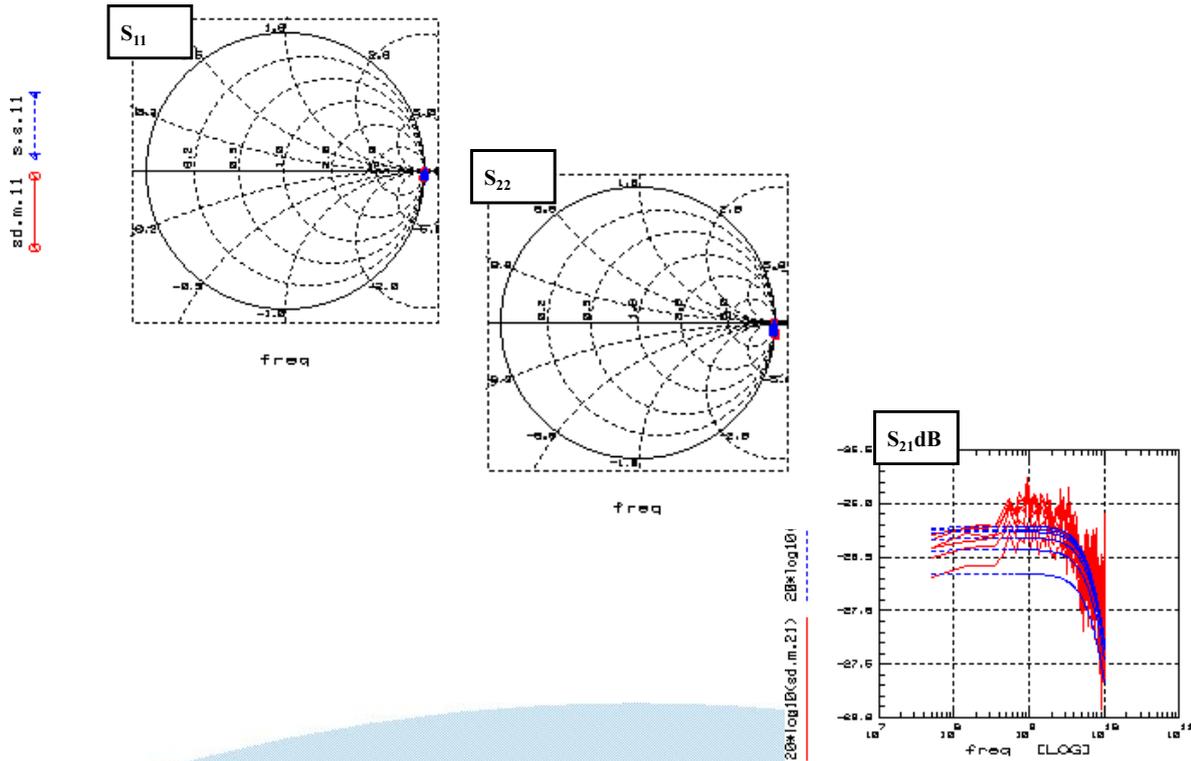
SLIDE 39

BSIM4のモデリング例(容量特性)



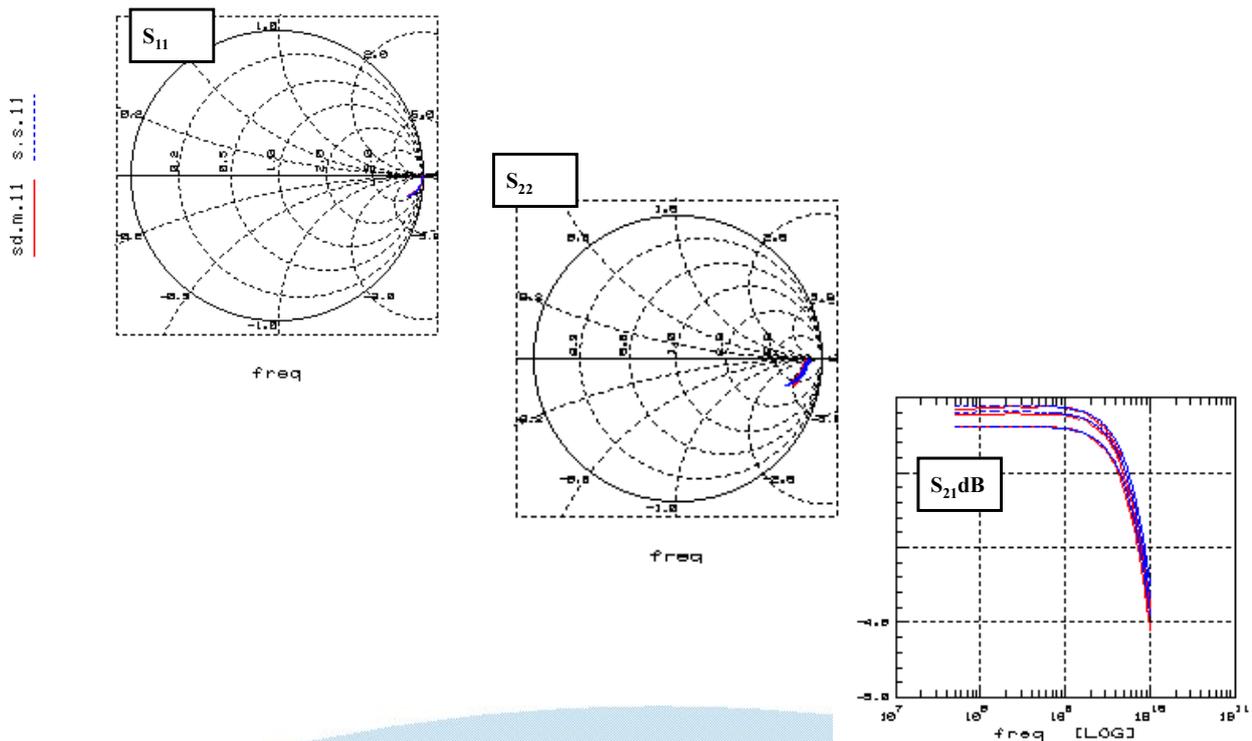
SLIDE 40

BSIM4のモデリング例 (S-Parameters特性 @1 finger)



SLIDE 41

BSIM4のモデリング例 (S-Parameters特性 @20finger)



SLIDE 42

- 周波数領域の解析とSパラメータ
Sパラメータとは
- 高精度にデバイスの高周波解析を行う為の技術
De-embedding
- BSIM3、BSIM4によるRFモデリング
- **RF回路検証の重要性**



RF回路検証の重要性

- パラメータのコンビネーション
- 物理的、電氣的にReasonableなパラメータ値
- De-embedの精度
- シミュレーション収束性

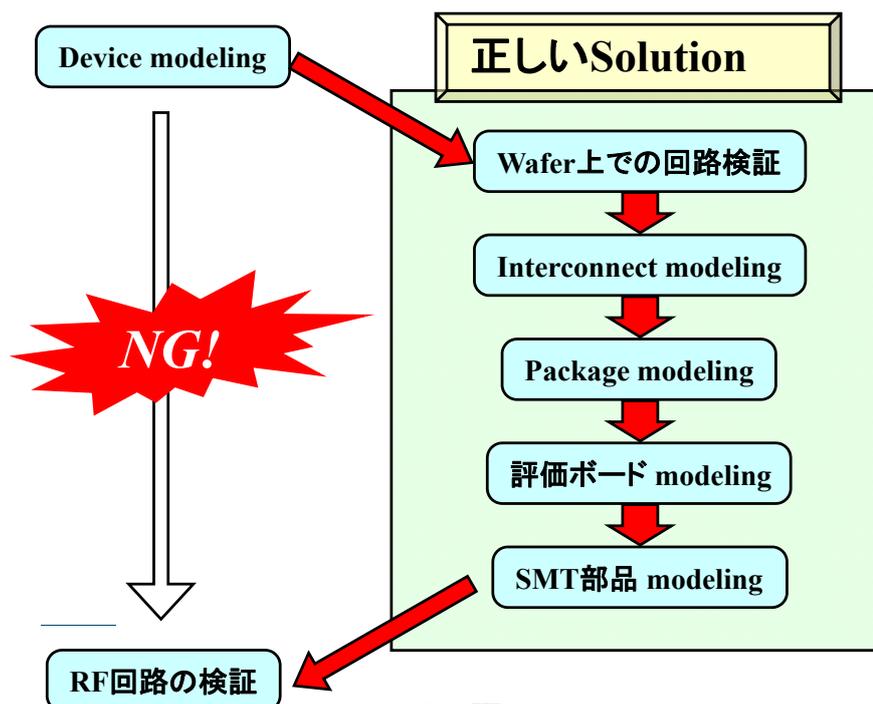
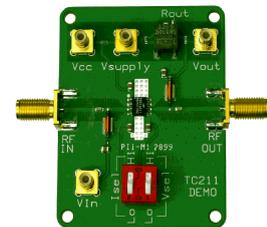
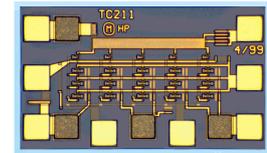
等を確認するために回路検証が重要。

■ 検証方法

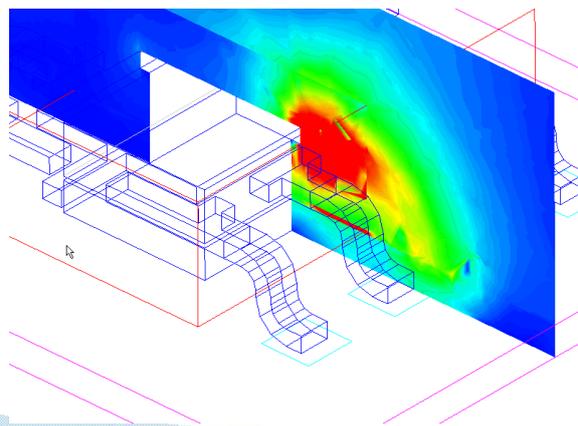
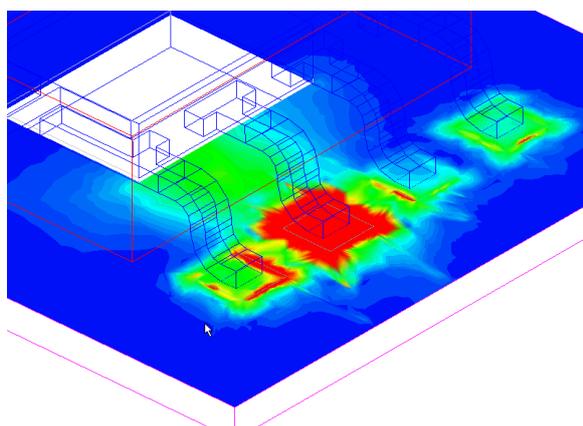
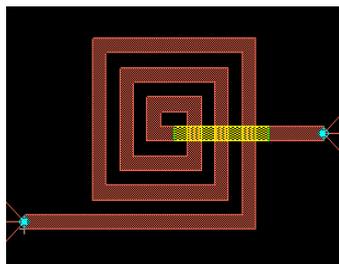
- 1) デバイス・モデリング
 - 2) オンウェハで回路検証(単純回路)を行い、デバイス・モデリングの検証を行う。
その後
 - 3) Interconnectモデリング
 - 4) パッケージ・モデリング
 - 5) 評価ボード・モデリング
 - 6) SMT部品モデリング
- というように、step-by-stepで回路検証を行う。

■ 注意する点

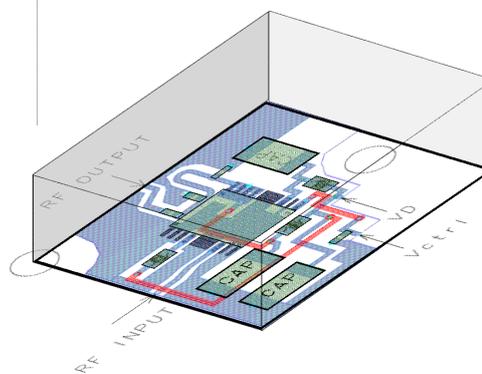
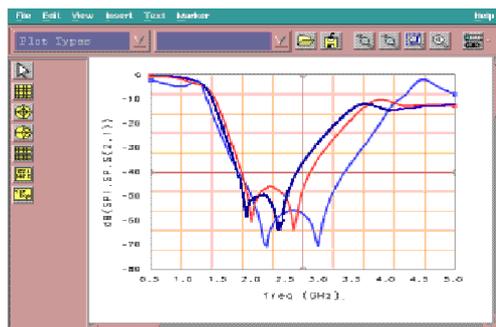
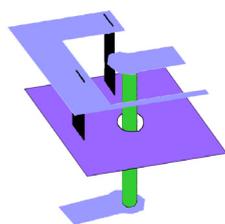
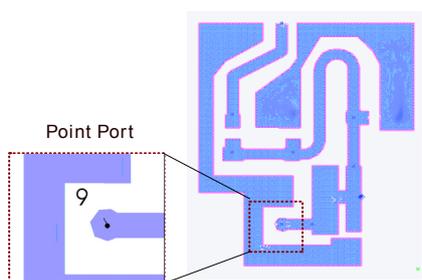
オンウェハ検証用の回路は複雑にしない。
デバイス以外にdominantな成分がない回路にする。



パッシブ部品、パッケージのモデリング例



評価ボード・モデリングの例



- 周波数領域の解析とSパラメータ
Sパラメータとは
 - ⇒高周波では周波数領域の解析が必要で、Sパラメータが便利
- 高精度にデバイスの高周波解析を行う為の技術
De-embedding
 - ⇒de-embeddingの精度はTEGに100%依存
- BSIM3、BSIM4によるRFモデリング
 - ⇒モデル等価回路とデバイス構造を理解した上でモデルを選ぶ
- RF回路検証の重要性
 - ⇒一気に複雑な回路で検証するのではなく、単純な回路でオンウェハ検証してから、徐々に複雑にしていく。