

InGaAs HEMT の小信号等価回路・大信号等価回路の作成

7308047 小山雅史

1. はじめに

近年、通信の高速化・大容量化や周波数資源の枯渇などにより、ミリ波などの高周波帯を用いた高速無線通信の実現が望まれている。そのためにはミリ波帯などでも動作する高速デバイスが必要である。高電子移動度トランジスタ (HEMT : High Electron Mobility Transistor) は高い電子移動度による優れた高周波特性を持ち、高速無線通信において有効なデバイスとして注目されている。

本研究では、東北大学電気通信研究所に提供していただいた InP 系 HEMT の一つである InGaAs HEMT について小信号等価回路と大信号等価回路を作成した。小信号等価回路からはトランジスタの高周波特性の指標である電流利得周波数と最大発振周波数を算出した。また大信号等価回路を用いて E 級増幅器を設計・シミュレーションし、効率の算出を行った。

提供していただいた InGaAs HEMT のパラメータは以下の通りである。

表 1 HEMT のパラメータ

ゲート幅 W_g	100 μ m	ゲート長 L_g	80nm
------------	-------------	------------	------

2. 小信号等価回路

2.1 小信号等価回路の作成

InGaAs HEMT にバイアスを印加して S パラメータを測定し、小信号等価回路の S パラメータと合わせることで回路素子の値を求める。図 1 に小信号等価回路を示す。 R_g , R_s , R_d は寄生抵抗, C_{gs} はゲート・ソース間容量, C_{ds} はドレイン・ソース間容量, R_{ds} はドレイン・ソース間抵抗, R_i はゲート下の半導体抵抗を表す。 g_{mo} は相互コンダクタンスである。フィッティングにより求めたパラメータを表 2 に示す。

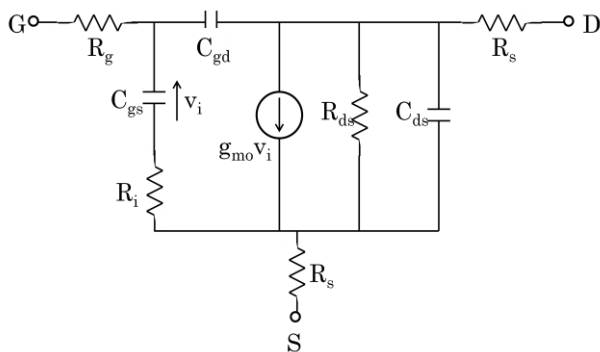


図 1 小信号等価回路

表 2 小信号等価回路のパラメータ

$R_g[\Omega]$	5.27	$C_{gs}[fF]$	49.7	$R_{ds}[\Omega]$	65.8
$R_d[\Omega]$	3.88	$C_{gd}[fF]$	12.6	$R_i[\Omega]$	0.332
$R_s[\Omega]$	1.81	$C_{ds}[fF]$	1.84	$g_{mo}[mS]$	120

2.2 g_m , f_t , f_{max} の算出

作成した小信号等価回路のパラメータから、トランジスタの高周波特性の指標である電流利得遮断周波数 f_t と最大発振周波数 f_{max} を近似的に求める。電流利得遮断周波数 f_t はドレイン・ソース間を短絡した時に電流利得が 1 になる時の周波数であり、小信号等価回路から次の式で求められる [1]。

$$f_t = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})} \quad \dots (1)$$

ここで g_m はソース側の寄生抵抗を考慮した相互コンダクタンスであり、次の式で与えられる [2]。

$$g_m = g_{mo} \cdot \frac{1}{1 + g_{mo} \cdot R_s} \quad \dots (2)$$

最大発振周波数 f_{max} は電力利得が 1 となる周波数で、電流利得遮断周波数 f_t を用いて次の式で求められる [3]。

$$f_{max} = \frac{f_t}{2\sqrt{(R_g + R_i + R_s) \cdot \frac{1}{R_{ds}} + 2\pi f_t C_{gd} (2R_g + R_s + R_i)}} \quad \dots (3)$$

式(1)~(3)を用いて、求めた小信号等価回路のパラメータから算出した g_m , f_t , f_{max} の値を表 3 に示す。

表 3 InGaAs HEMT の g_m , f_t , f_{max}

$g_m[mS]$	$f_t[GHz]$	$f_{max}[GHz]$
98.5	252	208

現在ゲート長の微細化が進み、InP 系 HEMT では 600GHz 以上の f_t を持つものが報告されている [1]。今回使用したトランジスタでも、60GHz 帯での無線通信システムへの応用には十分な値と考えられる。

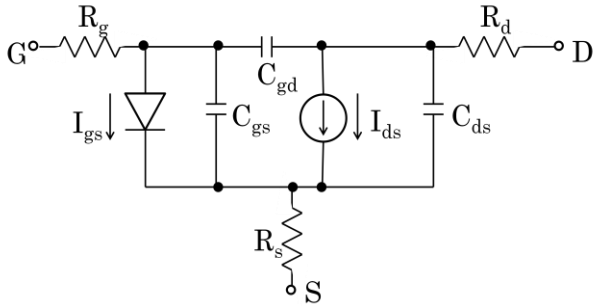


図 2 Curtice quadratic 大信号モデル

表 4 大信号等価回路のパラメータ

C_{gs} [fF]	C_{gd} [fF]	C_{ds} [fF]	α [1/V]	β [A/V ²]	λ [1/V]	V_{to} [V]
64.5	12.6	1.48	30	0.0748	0.765	-0.95

3. 大信号等価回路

3.1 大信号等価回路の作成

次に大信号等価回路を作成する。使用した大信号モデルは Curtice-quadratic 大信号モデルである。図 2 にその回路図を示す[4]。

モデル作成においては図 2 の $C_{gs} \cdot C_{gd} \cdot C_{ds}$ のほかに、直流特性を用いてドレイン電流 I_{ds} を決定するパラメータ α , β , λ , V_{to} を求めた。ここで V_{to} はしきい値電圧である。寄生抵抗 R_g , R_d , R_s の値は 2.1 で求めたものを使用する。表 4 に求めたパラメータを示す。

3.2 E 級増幅器

作成した大信号等価回路を用いて E 級増幅器を設計し、シミュレーションを行い効率を算出する。図 3 に設計した E 級増幅器の構成を示す。これは RF チョークを通してバイアス供給されたソース接地トランジスタの出力段にバンドパスフィルタをつないだもので、方形波入力に対し増幅された波形から基本波成分を抽出して出力するものである。

シミュレーションの諸元を表 5 に、フィルタの回路素子の値を表 6 に示す。入力は周波数が 60GHz の方形波とする。回路素子の値はドレイン電圧・電流から 60GHz の正弦波が出力されるように設定する。

ドレイン効率 η_{dc} の算出について説明する。ドレイン効率 η_{dc} は出力電力を P_{out} 、直流電源が消費した電力を P_{dc} とすると以下の式で表される[5]。

$$\eta_{dc} = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \quad \dots (4)$$

シミュレーション結果からドレイン効率を算出すると 75.0% となり、実際の設計を考慮しない簡単なシミュレーションではあるが、比較的高い効率を得られた。

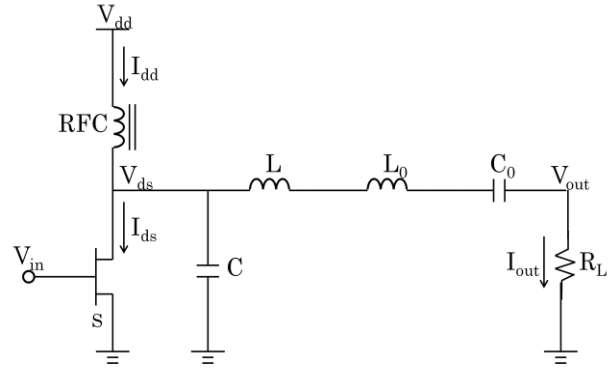


図 3 E 級増幅器

表 5 入力の諸元

入力波形	入力周波数	入力振幅	V_{dd} (バイアス)
方形波	60GHz	-1.0V~0.0V	0.9V

表 6 回路素子の値

L[nH]	C[fF]	L0[nH]	C0[fF]	RL[Ω]
0.153	9.74	1.00	7.04	50

4. まとめ

本研究ではまず InGaAs HEMT の小信号等価回路を作成し、トランジスタの高周波特性の指標である電流利得遮断周波数と最大発振周波数を算出した。その結果から、InGaAs HEMT の高い周波数特性を確認できた。

次に大信号等価回路を作成し、それを用いて E 級増幅器を設計しシミュレーションを行った。シミュレーション結果からドレイン効率を算出すると 75.0% となり、簡単なシミュレーションではあるが高い効率を得られた。

今後は 60GHz 帯で動作する InGaAs HEMT を用いた通信デバイスの試作に向け、より適切な大信号モデルの検討や高効率 E 級増幅器の設計を行う。

参考文献

- [1] 大橋弘通, 葛原正明, “パワーデバイス (半導体デバイスシリーズ)”, 丸善, 2011
- [2] 葛原正明, “トランジスタ入門” マイクロウェーブ展ワークショップ, 2010
- [3] 小西良弘, 本城和彦, “マイクロ波半導体回路”, 日刊工業新聞社, 2005
- [4] Walter R. Curtice, “A MESFET Model for Use in the Design of GaAs Integrated Circuits”, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, 1980
- [5] 上野伴希, “無線機 RF 回路実用設計ガイド”, 総合電子出版社, 2004