

## 7. 相互コンダクタンスと負荷容量の適正化

電界効果トランジスタを用いた増幅回路では、電圧増幅率は負荷抵抗の値に比例する性質があります。このときの比例定数を相互コンダクタンスといい、 $g_m$ の記号で表します。相互コンダクタンスが大きい増幅素子ほど高い増幅率が得やすくなり、相互コンダクタンス $g_m$ は増幅素子の電流制御能力を示す値とも云えます。

弊社が取り組むテーマは、如何にして『発振性能の確保と相互コンダクタンスの極小な増幅素子の両立』を図るかと言い換える事もできます。

一般に接合型 FET は、ゲート電圧がドレイン・ソース間電圧よりも低い電圧 ( $V_{gs} < V_{ds}$ ) で用いられ、ゲート端子は高インピーダンスでほとんど電流は流れない。したがって、ドレインからソースへ流れる貫通電流  $I_{ds}$  のみを考察すれば良いことになります。ソース電圧を基準に、ゲート電圧を  $V_{gs}$ 、ドレイン電圧を  $V_{ds}$  と表し、 $I_{ds}$  はこれらの関数としてモデル化されてます。

この関数は、定義域をオーム領域 (線型領域)、飽和領域、ピンチオフ領域という三つの領域に分けられています。飽和領域は主として増幅用途に用いられ、ドレイン電圧によらず一定で、ゲート電圧についてはピンチオフ電圧からみて理想的には2乗の特性を持ち、次式で表されています。

$$I_{ds} = \frac{I_{DS}}{V_{th}^2} (V_{gs} - V_{th})^2 = \beta (V_{gs} - V_{th})^2 \quad (V_{ds} > V_{gs} - V_{th}, V_{gs} > V_{th})$$

このとき、 $I_{DS}$  はドレイン飽和電流とよばれ  $V_{gs} = 0$  で流れるドレイン・ソース電流に相当します。関数を微分すると、求める相互コンダクタンス (微分係数は  $I_{ds}$  の勾配) で表すことができます。すなわち、

$$g_m = \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{gs}} = 2\beta (V_{gs} - V_{th})$$

となる。そのとき貫通電流  $I_{ds}$  は、次式で表され

$$I_{ds} = \frac{1}{2} g_m (V_{gs} - V_{th})$$

NMOSとPMOSで構成するCMOSインバータは、

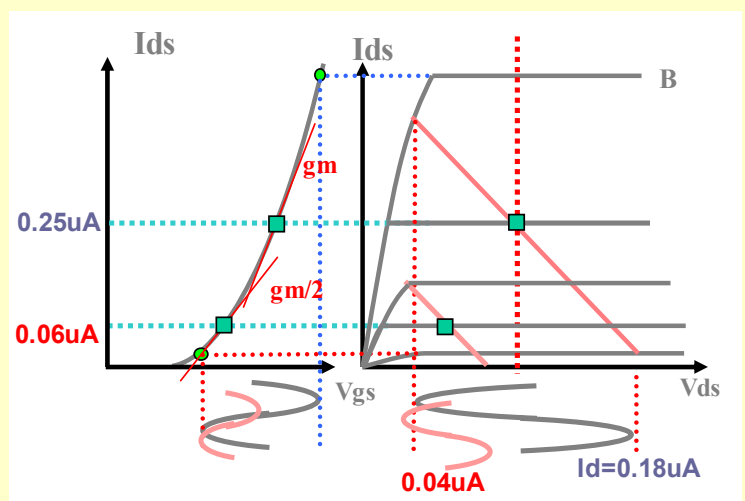
$$I_{ds} = I_{dsN} + I_{dsP} = g_m (V_{gs} - V_{th})$$

一方、負性抵抗  $R_L$  の大きさは、

$$|R_L| = \frac{g_m}{(4\pi f \cdot C_L)^2}$$

但し、 $C_g = C_d = 2C_L$ 、 $\omega = 2\pi f$ とした場合である。

負帰還抵抗  $R_f = \infty$  時の理想的な特性を示し、その大きさは相互コンダクタンス  $g_m$  との間に比例の関係が成立つ。



単純に相互コンダクタンスを $g_m/2$ にすると負性抵抗を低下( $R_L/2$ )させることになり都合が悪い。お気付きと思いますが、負荷容量を $C_L/\sqrt{2}$ とすれば、負性抵抗は変わらずに一定な大きさを保つことができます。何故なら、負性抵抗は周波数 $f$ と負荷容量 $C_L$ を独立にもつ関数 $R_L(f, C_L)$ で、それぞれが逆2乗の特性を有するからです。

表1に相互コンダクタンスと負荷容量の関係を示します。発振周波数 $f_o$ に於ける負性抵抗の関数 $R_L(C_L)$ にパラメータ $g_m$ を代入し、負性抵抗が一定を保つ様、適正な負荷容量 $C_L$ を施せば、貫通電流 $I_{ds}$ のみを大幅に削減できることを示しています。

CMOSの相互コンダクタンス $g_m$ は、 $\beta(V_{gs}-V_{th})$ に等しく、 $\beta=(W/L)\mu C_{ox}$ は固有値故に、貫通電流 $I_{ds}$ は $(V_{gs}-V_{th})^2$ に比例すると云う関係が成り立つからです。すなわち、次式(1)への誘導は回路設計上、有効で意義あるものになるでしょう。

$$\frac{I_{ds}}{I_{ds0}} = \left[ \frac{V_{gs} - V_{th}}{V_{gs0} - V_{th}} \right]^2 = \left[ \frac{C_L}{C_{L0}} \right]^4 \quad (1)$$

但し、 $\beta$ 、 $f_o$ および $R_L$ が一定であるとき。  
 図1に示す貫通電流 $I_{ds0}(=3.0\mu A)$ にて $g_{m0}$ を求めると、 $g_{m0}=24.2\pm 6.0\mu A/V$ 。但し、 $V_{th}=0.6V\pm 5\%$ (仮定)。抵抗挿入法で測定した $R_L(=R_e+R_x)$ から、 $g_m$ を求めると、 $g_m=23.0\mu A/V$ となり  $g_m(I_{ds})$ 、 $g_m(R_L)$ なる相互コンダクタンスの値は一致する。これは、式(1)が実用的で、大変有効であることを示しています。

今回は、相互コンダクタンス $g_m$ を有する帰還増幅器に対し、敵正な負荷容量の範囲( $C_{LMIN}$ と $C_{LMAX}$ )を定義します。その際、高い発振性能と安全性を確保する第一の条件に、SII独自に基準化した最適な負性抵抗 $R_L(=-750k\Omega \pm 400k\Omega)$ を推奨致します。

固有の $g_{mn}$ を有する帰還増幅器を $OSC_n(n=0,1,2,3,\dots)$ で表し、 $g_{m0}=R_{L0} \times (2\omega C_{L0})^2(=24.2\mu A/V)$ の記号を用いて、相互コンダクタンス $g_{mn}$ と負荷容量 $C_{Ln}$ の適正化を行います。但し、 $R_{L0}=-870k\Omega$ 、 $C_{L0}=12.5pF$ とする。

適正な負荷容量 $C_{Ln}$ は式(2)より求められる。式(2)より、各 $OSC_n$ の負荷容量範囲を求める便利な変換式(3)を紹介し、結果は表2に示すとおりで、低消費化をご検討されている開発設計者の皆様方には是非ご活用下さい。帰還増幅器 $OSC_4$ の出現が、『低CL発振子』の価値(エコロジー・デバイス)を高める事になるでしょう。

$$C_{Ln} = \sqrt{\frac{g_{mn}}{g_{m0}}} \times C_{L0} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} (C_{Ln})_{MIN} &= \sqrt{\frac{R_{L0}}{R_{LMAX}}} \times C_{Ln} \\ (C_{Ln})_{MAX} &= \sqrt{\frac{R_{L0}}{R_{LMIN}}} \times C_{Ln} \end{aligned} \right\} (3)$$

超低消費電力マイコン(78K0/KC2-L, 78K0R/Kx3-Lおよび78K0R/Lx3, R8C/Lxなど)とセットでご使用頂くことで、従来のマイコンの待機電流( $5\mu A$ )に対して、消費電力約80%削減( $1\mu A$ 以下)が可能となり、待機電力の大幅削減に貢献いたします。電池駆動の電子機器の長寿命化・長時間化やエコロジー製品の省エネルギー化に、是非SIIの低CL発振子をご活用下さい。

表1.相互コンダクタンス $g_m$ と負荷容量 $C_L$ の関係

$g_m(\mu A/V)$	$C_L(pF)$	$ R_L (k\Omega)$	$I_{ds}(\mu A)$
$g_m$	$C_L$	$g_m/(4\pi f_o \cdot C_L)^2$	$I_{ds}$
$g_m/2$	$C_L/\sqrt{2}$	$g_m/(4\pi f_o \cdot C_L)^2$	$I_{ds}/4$
$g_m/4$	$C_L/2$	$g_m/(4\pi f_o \cdot C_L)^2$	$I_{ds}/16$
$g_m/8$	$C_L/2\sqrt{2}$	$g_m/(4\pi f_o \cdot C_L)^2$	$I_{ds}/64$

図1. CMOS帰還増幅器の貫通電流測定

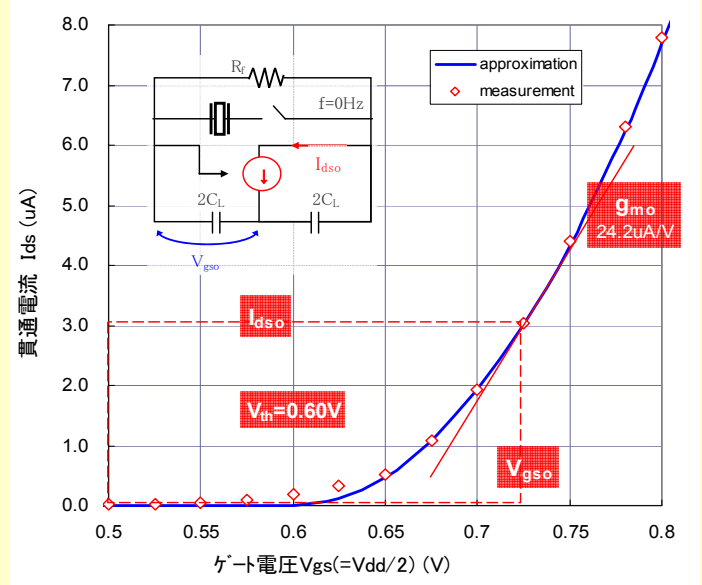


表2. 相互コンダクタンス $g_m$ と負荷容量 $C_L$ の適正化(参考値)

$OSC_n$	$g_{mn}(\mu A/V)$	$C_{LMIN}(pF)$	$C_{LMAX}(pF)$	$I_{ds}(\mu A)_{MAX}$
$OSC_0$	24.2	10.9	19.7	3.025
$OSC_1$	12.1	7.7	13.9	0.756
$OSC_2$	6.1	5.4	9.9	0.189
$OSC_3$	3.0	3.8	7.0	0.047
$OSC_4$	1.5	2.7	4.9	0.012

設計条件;  $R_L=-750k\Omega \pm 400k\Omega$   
 便利な安全ファクタ(目安);  $C_{LMIN} \approx 0.6 \cdot C_{LMAX}$

**「低CL発振子」コラム**  
 超低消費電力マイコン  
 専用の低CL発振子のご紹介

次回掲載予定

