

時計用水晶発振回路の解析

本多 誠一* , 綿引 猛*

(昭和50年9月8日受理)

On Analysis of Quartz Crystal Oscillator Circuit for Quartz Watches

SEIICHI HONDA and TAKESHI WATAHIKI

Abstract:—Quartz crystal oscillators for the quartz watches are different from the ordinary quartz oscillators. Because, for the quartz watches, the quartz crystal resonators are low frequency (ordinary 32.768kHz) and small size, and the active elements are C-MOS IC inverters. These condition means that the construction of the circuit and the selection of the circuit elements values are not easy.

We measured characteristics values of the quartz crystal resonators and C-MOS inverters. Then accomplished the analysis of the circuit and optimum circuit elements values fit for such oscillators.

We confirmed experimentally the optimum conditions for the oscillators and got stable quartz crystal oscillators.

1. ま え が き

時計(特に腕時計)用水晶発振回路は通常の水晶体発振回路と異なり、水晶体振動子は低周波(通常32.768kHz)で小形のもので用いられ、従ってそのCI(Cry-stal Impedance)が高く、また能動素子としてはC-MOS ICが用いられるためにその能動性は通常のトランジスタなどに比して相当低いので発振回路としてもそれに適した構成でなければならない。

ここではそのような条件に適する発振回路の解析を行ない回路素子定数の最適値を求め実際に発振実験を行った。

2 C-MOSインバータの特性の測定

時計用C-MOS ICの一つとして μ PD805(NEC)の水晶体発振用インバータ部分の回路はFig. 1のようである。Fig. 1の V_{SS} を基準として V_{DD} には $V_{DS} = 1.55V$

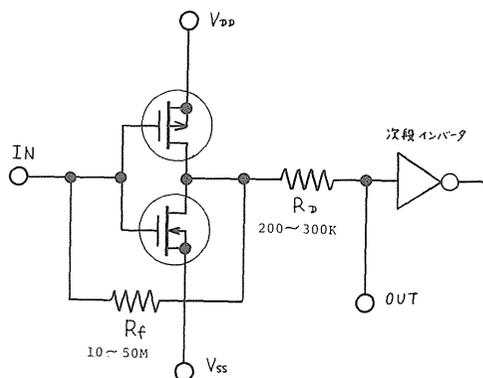


Fig. 1 Inverter for quartz crystal oscillator in C-MOS IC

の電源を与え、IN端子には電圧 V_{GS} を与えてOUT端子の開放電圧 V_o および V_{DD} 端子に流れる電流 I_D を測定

* 茨城大学工学部電子工学科(日立市中成沢町)

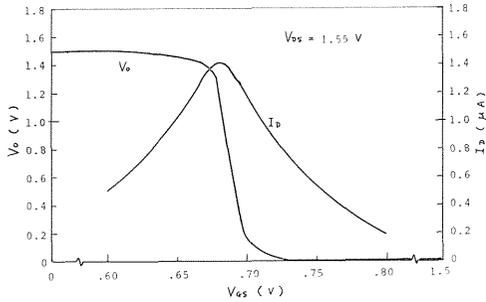


Fig. 2 Static characteristic of C-MOS Inverter

した結果を Fig 2 に示した。

Fig. 2 より, $V_{GS} = 0.69 \text{ V}$ 付近の増幅率 μ を求めれば

$$\mu = \left(\frac{d V_O}{d V_{GS}} \right)_{V_{GS} = 0.69 \text{ V}} = 60 \quad (1)$$

となる。

2.1 相互コンダクタンスとその周波数特性の測定, Fig. 1 の IN 端子に交流電圧を与え, OUT 端子には電流計 (実際には $1 \text{ K}\Omega$ の標準抵抗と並列に電子式電圧計を用いた) を接続して, 相互コンダクタンス g_m を測定した結果を Fig. 3 に示した。なお Fig. 3 に示した結果は電極間容量による貫通コンダクタンスを実験的より除去した結果である。(1)式および Fig. 3 の結果より, C-MOS インバータの内部抵抗を r_D とすれば

$$\mu = 60, \quad g_m = 30 \mu\text{S}, \quad r_D = 2 \text{ M}\Omega \quad (2)$$

の結果が得られる。また g_m の 3 dB 低下の周波数は約 80 KHz である。

2.2 入出力容量, 出力端子短絡の場合の入出力容量

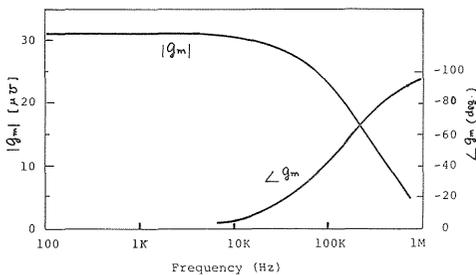


Fig. 3 Mutual conductance of C-MOS Inverters

C_i は漂遊容量を含めて

$$C_i = 12 \text{ P F} \quad (3)$$

また, 入力端子開放の場合の出力端子からみた容量 C_o は, 漂遊容量および次段インバータ容量も含めて

$$C_o = 10 \text{ P F} \quad (4)$$

であった。

3. 水晶振動子の等価定数

水晶振動子の等価回路は Fig 4 のように示されることはよく知られている。時計用水晶振動子としての等価定数の測定は行なわなかったが, 種々の文献より (C_o には漂遊容量も含めて)

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= 10,000 \text{ H} \\ C_1 &= 0.0025 \text{ P F} \\ R_1 &= 30 \sim 40 \text{ K}\Omega \\ C_o &= 10 \text{ P F} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

とすることとした。

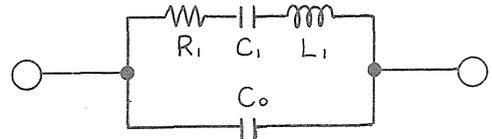


Fig. 4 Equivalent circuit of the quartz crystal resonator

4. 発振条件の解析

水晶振動子と C-MOS インバータとを組合わせた Fig. 5 のような Pierce 形発振回路について考えてみ

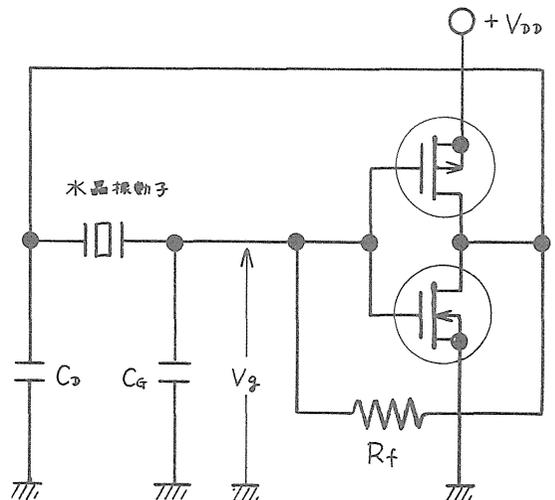
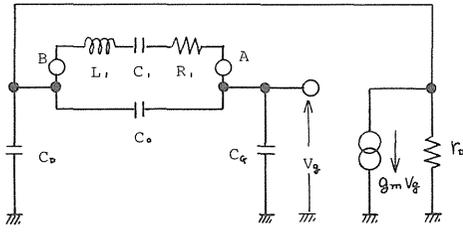
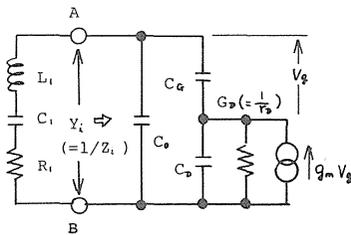


Fig. 5 Pierce type Crystal Oscillator with C-MOS Inverter



(a)



(b)

Fig. 6 Equivalent Circuits of Fig. 5

よう。ただし Fig. 5 では Fig. 1 に示したインバータの出力に挿入された抵抗 R_D と次段インバータは省略してある。Fig. 5 で水晶振動子を Fig. 4 のような等価回路でインバータを g_m, r_D の等価定数で示せば Fig. 6 (a) のような回路になる。Fig. 6 (a) で, A, B 端子より上方の素子 (L_1, C_1, R_1) を左側に, A, B 端の下方の素子を右側に書きかえれば Fig. 6 (b) のようになる。

Fig. 6 (b) で A B 端子から右方をみたアドミッタンスを Y_i とすれば

$$Y_i = \frac{Y_G \cdot Y_D}{Y_G + Y_D + g_m} + Y_0 \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} Y_G &= j B_G \quad (B_G = \omega C_G) \\ Y_D &= G_D + j B_D \quad (B_D = \omega C_D) \\ Y_0 &= j B_0 \quad (B_0 = \omega C_0) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6) 式の Y_i を

$$Y_i = G_i + j B_i \quad (8)$$

とおき(6)(7)式より G_i, B_i を求めれば

$$G_i = \frac{-g_m B_D B_G + G_D B_G^2}{(B_D + B_G)^2 + (g_m + G_D)^2} \quad (9)$$

$$B_i = B_0 + \frac{g_m B_G G_D + B_G (G_D^2 + B_D^2) + B_G^2 B_D}{(B_D + B_G)^2 + (g_m + G_D)^2} \quad (10)$$

$Y_i (= G_i + j B_i)$ が求めれば入力インピーダンス $Z_i (= 1/Y_i)$ は

$$Z_i = R_i + j X_i \quad (11)$$

とおき

$$R_i = \frac{G_i}{B_i^2 + G_i^2}, \quad X_i = \frac{-B_i}{B_i^2 + G_i^2} \quad (12)$$

4.1 発振条件および発振周波数, Fig. 6 (b) で AB 端子から右方をみた水晶振動子のインピーダンス Z_x を

$$\left. \begin{aligned} Z_x &= R_1 + j X_1 \\ X_1 &= \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

とおけば, 発振条件は

$$\left. \begin{aligned} R_i + R_1 &< 0 \\ X_i + X_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となることである。なお X_1 は

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_1 C_1}, \quad \omega C_1 \approx \omega_0 C_1, \quad \Omega = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \quad (15)$$

とおけば

$$X_1 \approx \frac{2 \Omega}{\omega_0 C_1} \quad (16)$$

ゆえに(14)式 $X_i + X_1 = 0$ の条件から, 発振基準化周波数偏移 Ω は

$$\Omega = \frac{1}{2} \omega_0 C_1 X_i \quad (17)$$

となる。

5. 発振最適回路定数の数値例

C-MOS インバータの定数を(12)式のように

$$g_m = 60 \mu\text{V}, \quad G_D (= 1/r_D) = 0.5 \mu\text{V} \quad (2)$$

として, また C_0 は(5)式のように 10 pF として, 周波数は実際には 32.768 kHz であるが簡単のために

$$\omega = 2 \times 10^5 \text{ rad/sec} \quad (31.830 \text{ kHz}) \quad (18)$$

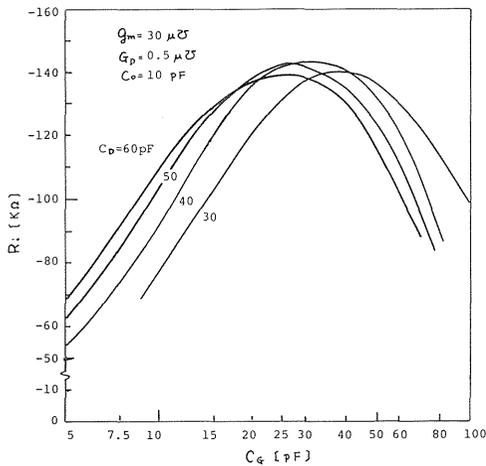


Fig. 7 Computed values of negative resistance R_i

として種々の C_D , C_G の値に対する負性抵抗 R_i の値を計算した結果を Fig. 7 に示した。Fig. 7 より負性抵抗 $|R_i|$ が最大となる C_D , C_G の値はそれほどクリチカルなものではなく、また(14)式

$$R_i + R_1 < 0 \quad (14)$$

が成立するためには R_1 が(5)式のような値であれば、 C_D , C_G の相当の広範囲にわたって発振が可能であることを示している。

$|R_i|$ が最大となる C_D , C_G の値を Fig. 7 より

$$C_D = 40 \text{ pF}, C_G = 35 \text{ pF} \quad (19)$$

とすれば(9)(10)(12)式より

$$\left. \begin{aligned} B_i &= 2.820 \mu\text{V} & G_i &= -1.433 \mu\text{V} \\ X_i &= -282 \text{ k}\Omega & R_i &= -143.3 \text{ k}\Omega \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

となる。(17)式より発振規準化周波数偏移 Ω は

$$\Omega = +7.05 \times 10^{-5} \quad (21)$$

となる。従って水晶振動子を製作する際に、その共振周波数は予め希望発振周波数より(21)式の値だけ低目しておくことが必要である。しかし厳密には $|R_i| > |R_1|$ によって生ずる C-MOS インバータの飽和現象によって(21)式の値は相当異なってくるのが考えられる。

6. むすび

上述の解析の結果に基づき、C-MOS インバータには $\mu\text{PD} 805$ (NEC), 水晶振動子には棒状たわみ振動形(東通製)を用い、 $C_D = 40 \text{ pF}$, $C_G = 15 \text{ pF}$ の固定コンデンサと最大 5 pF の可変コンデンサを用いて、発光ダイオードによるデジタル表示形水晶時計を試作した結果、おおむね解析結果と一致することが確められ、またその水晶時計の精度は現在のところ1ヶ月に約10秒の進みがあるが、これは C_G の可変コンデンサをさらに厳密に調整すれば1ヶ月に $\pm 4 \sim 5$ 秒の誤差となるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 例えば Chuang S. S. and Burnett "Analysis of C-MOS Quartz Oscillators" CIC 1974-C2.2
- 2) 内田, 本多, 菊地 「Pierce GP 圧電発振器における回路定数および水晶振動子面積の最適値について」電気通信学会誌 昭和27年3月