

# 温度検出スイッチ回路のしきい温度解析

## Theoretical analysis of threshold temperature on CTS circuit

萩原 淳史      廣瀬 哲也      浅井 哲也      雨宮 好仁  
 Atsushi Hagiwara      Tetsuya Hirose      Tetsuya Asai      Yoshihito Amemiya

北海道大学大学院 情報科学研究科  
 Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

### 1. はじめに

特定の温度を超えると回路動作が急激に変化する温度検出スイッチ (CTS) を先に提案した[1]。その回路図と動作特性を図 1 に示す。CTS 回路の出力ノード電圧  $V_b$  は、低温では高い値であり、しきい温度以上で低い値に遷移する。この急激な変化を温度スイッチとして利用する。本稿では、CTS 回路のスイッチ動作を解析し、そのしきい温度の定式化を行う。

### 2. 回路動作

CTS 回路は、2 つの電流パスの相互作用で動作点が決まる。左の電流パスでは電流  $I$  によって出力ノード電圧  $V_b$  が決まり ( $I \rightarrow V_b$ )、右の電流パスでは電圧  $V_b$  によって電流  $I$  が決まる ( $V_b \rightarrow I$ )。図 2 に、異なる温度 (図 1 の  $T_1, T_2, T_3$ ) における各電流パスの電圧電流特性を示す (点線は  $I \rightarrow V_b$  のパス, 実線は  $V_b \rightarrow I$  のパス)。低温では、2 つの曲線は交点 A と B を持つ。A は安定点、B は不安定点である。初期電圧が B 点の電圧よりも大きいとき、回路の動作点は A に動いて安定する。初期電圧が B 点の電圧よりも小さいときは、電圧・電流ともにゼロとなる。温度上昇に従い、2 つの電流電圧特性は変化して徐々に離れていく。しきい温度を超えると 2 つの曲線は交点を持たなくなり、電圧電流がゼロとなって回路はオフになる。

### 3. しきい値温度の定式化

この回路で「M3 と M5 が弱反転飽和領域、M7 が強反転線形領域で動作している」という場合には、しきい温度を解析的に求めることができる。各パスの電流を  $I$  とすると、次の 2 つの式が成立する。

$$V_b = 2\{V_{th} + \eta V_T \ln(I/I_0)\} \quad (\text{M3 と M5 において}) \quad \dots (1)$$

$$I = \beta(V_b - V_{th})\eta V_T \ln(K) \quad (\text{M7 において}) \quad \dots (2)$$

ここで  $V_{th}$  はしきい値電圧、 $\eta$  はサブスレッショルドスロープ係数、 $V_T (=k_B T/q)$  は熱電圧、 $I_0$  はサブスレッショルド電流の前置係数、 $\beta$  は電流利得係数、 $K$  は CTS 回路の  $M_5$  と  $M_6$  のサイズ比 ( $K=M_6/M_5$ ) を表す。この 2 式より、電圧  $V_b$  の温度係数  $dV_b/dT$  を計算できる。この温度係数は低温では負の値を持つので、 $V_b$  は温度上昇と共に減少する。図 1 で示されるように、温度係数  $dV_b/dT$  が負の無限大となるとき温度がしきい温度である。そのときの電圧  $V_b$  としきい温度  $T_c$  は、式(1)と(2)から次のように求まる。

$$V_b = V_{th0} - \kappa T + 2\eta V_T \quad \dots (3)$$

$$T_c = \frac{V_{th0}}{2\eta \frac{k_B}{q} \left\{ 1 - \ln \left( 2M \frac{\eta^2}{\eta - 1} \ln(K) \right) \right\} + \kappa} \quad \dots (4)$$

ここで  $V_{th0}$  は絶対零度におけるしきい値電圧、 $\kappa$  はしきい値電圧の温度係数、 $M$  は CTS 回路の  $M_5$  と  $M_7$  のサイズ比 ( $M=M_5/M_7$ ) を表す。図 3 にしきい温度  $T_c$  の計算値とシミュレーション結果の比較を示す。比較的良好一致し、式(3)によってしきい温度  $T_c$  を設計することが可能である。

### 参考文献

[1] 萩原他, 電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-12-21 2005 年 9 月

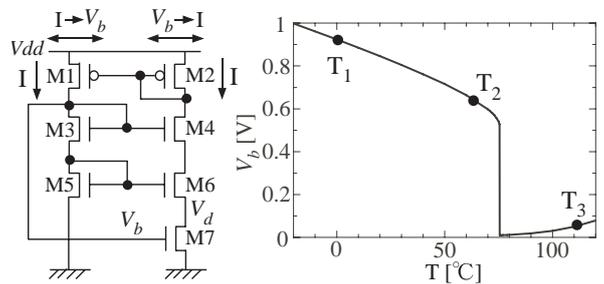


図 1 CTS 回路の回路構成 (右) と温度に対する出力ノード電圧の変化特性 (左)。

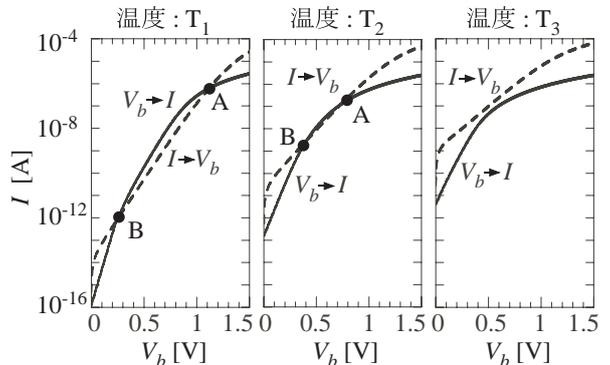


図 2 異なる温度 ( $T_1, T_2, T_3$ ) における電流電圧特性。低温のときは安定動作点が存在するが、しきい温度  $T_c$  以上では安定動作点が存在しない。

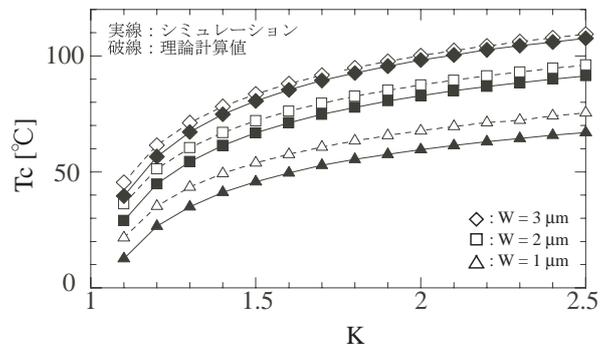


図 3 設計パラメータを変えたときのしきい温度  $T_c$  の変化。シミュレーション結果 (実線) と理論計算値 (破線) を比較して示す。