

広範囲な活性化エネルギーに対応した CMOS品質劣化モニタセンサ

システムLSIワークショップ 2005

上野憲一*， 廣瀬哲也， 浅井哲也， 雨宮好仁

北海道大学 大学院情報科学研究科 情報エレクトロニクス専攻

* k_ueno@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

<http://sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp/>

研究背景・目的

システムLSIワークショップ
2005

製品の品質・保証について

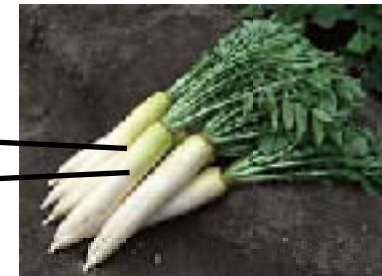
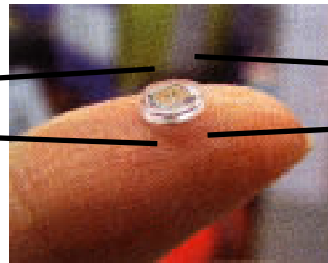
- ・賞味期限
- ・流通状態
- ・保管状態

生産者の予想で設定 ⇨ 設定方法は適切ではない
流通・保管状態 → 変化

問題点 - 新鮮な製品も賞味期限に従い捨てられてしまう

品質の劣化を適切に、かつ動的に知りたい

品質劣化モニタセンサ



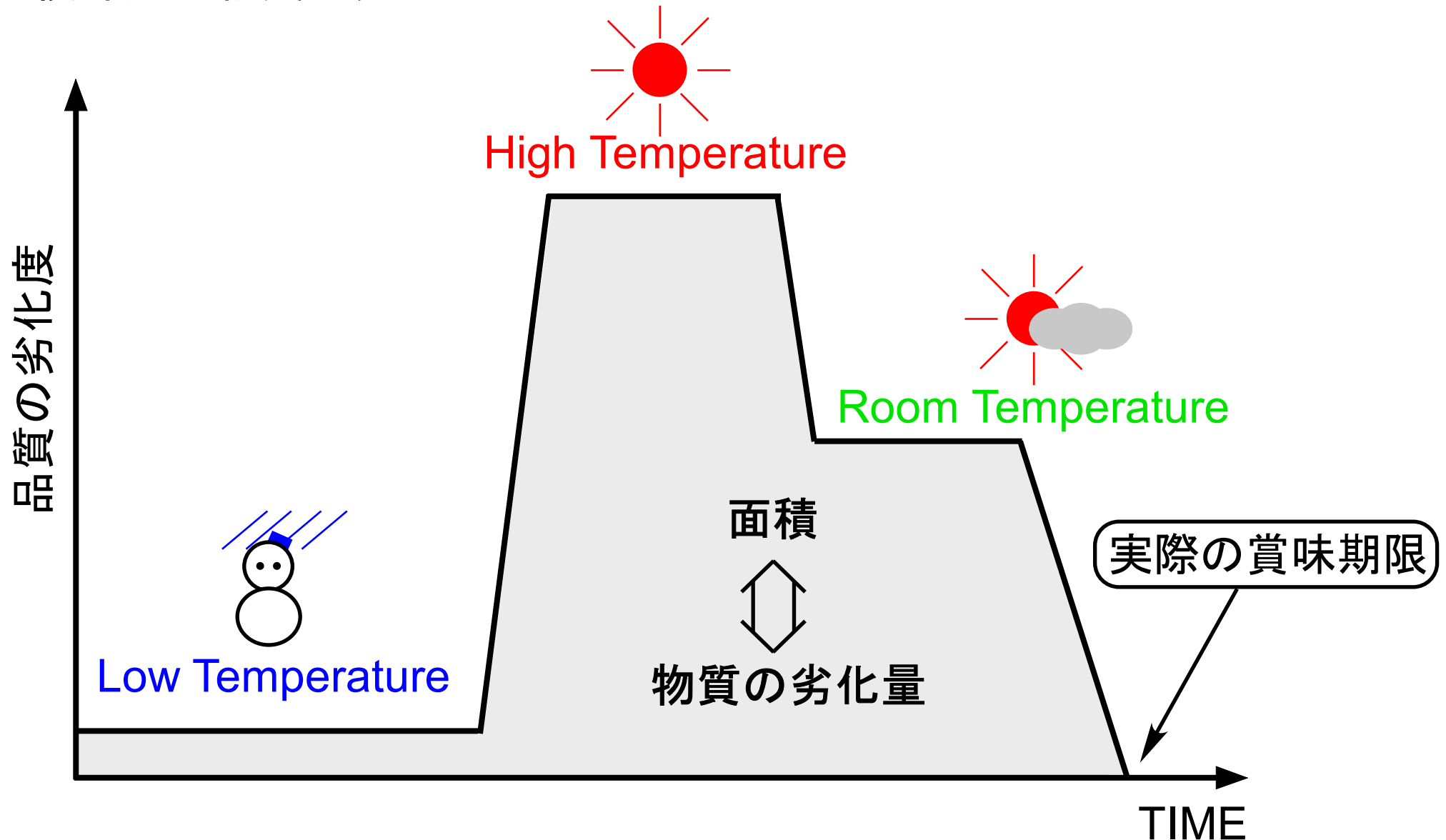
製品が新鮮かどうか判断可能

⇨ **品質劣化をモニタするLSIの提案**
(食品、乳製品、酒類、医薬品...)



品質劣化の温度依存性

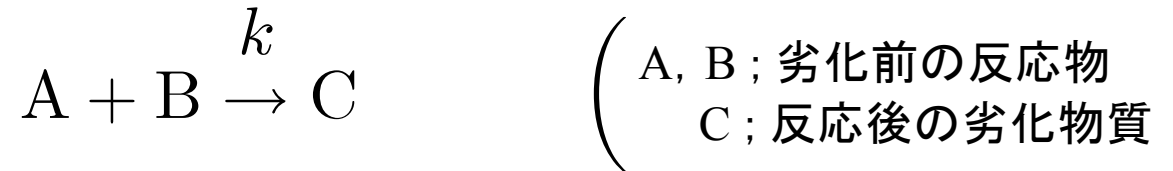
面積部分→物質の劣化量



品質劣化モデル

システムLSIワークショップ
2005

品質の劣化過程；



品質劣化の反応速度；

$$k = k_0 \exp \left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T(t)} \right)$$

劣化物質Cの濃度；

$$[C] = [A]_0 [B]_0 k_0 \int_0^{t=t_1} \exp \left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T(t)} \right) dt$$

(品質劣化は、温度履歴に強く依存)



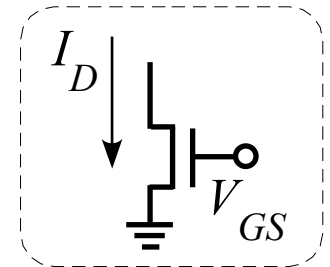
上記モデルの回路化を行う

Reference

P.W. Atkins, Physical Chemistry, sixth edition, Oxford University Press, 1998.

- MOSFETの弱反転電流

$$I_{DS} = I_0 \exp\left(\frac{e(V_{GS} - V_{TH})}{\eta k_B T}\right)$$

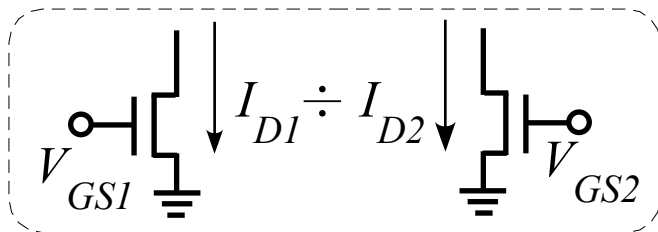


- 弱反転電流の割算(I_0 , V_{TH} をキャンセル)

$$\frac{I_{DS2}}{I_{DS1}} = \exp\left(-\frac{e(V_{GS1} - V_{GS2})}{\eta k_B T}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right)$$

活性化エネルギーの設定

$$\Delta E_a = \frac{e(V_{GS1} - V_{GS2})}{\eta}$$



- $\frac{I_{DS2}}{I_{DS1}}$ を積分; $\int_0^{t1} \left(\frac{I_{DS2}}{I_{DS1}}\right) = \int_0^{t1} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right) dt$



物質の劣化過程を模擬可能

Reference

T. Hirose et al., "Watchdog circuit for quality guarantee with subthreshold MOSFET current,"
IEICE Trans. Electron, Vol.E87-C, no.11, pp.1910-1914, Nov. 2004.

回路化の問題点

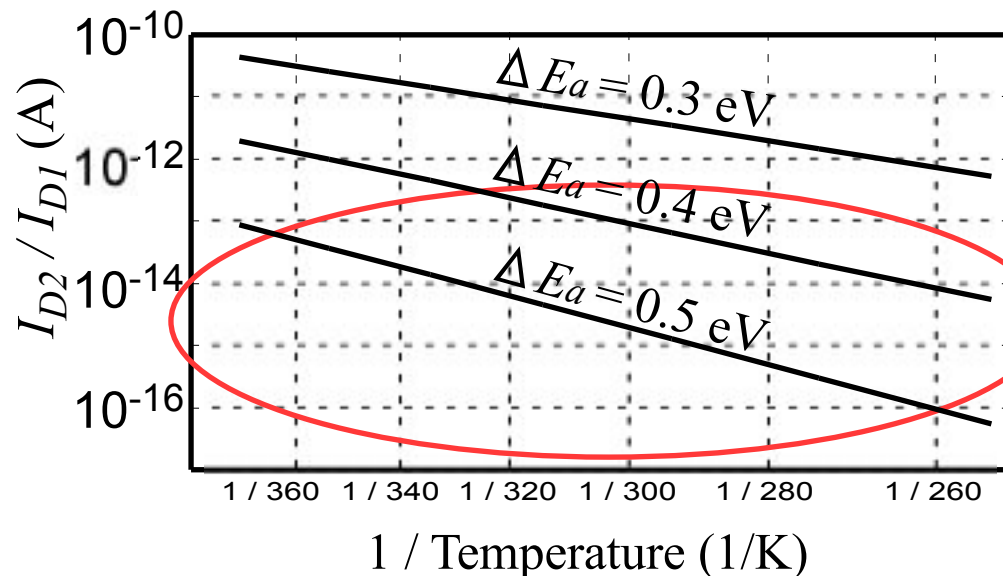
一般的な食品: $\Delta E_a > 0.5 \text{ eV}$

> ΔE_a の設定に限界

$$\Delta E_a = \frac{e(V_{GS1} - V_{GS2})}{\eta}$$

Subthreshold Bias

> $\Delta E_a > 0.4 \text{ eV} \Rightarrow I_{D2} / I_{D1}; 10^3$ 以上の電流変化



リーク電流領域

アナログ回路 → 大きな ΔE_a は実現できない

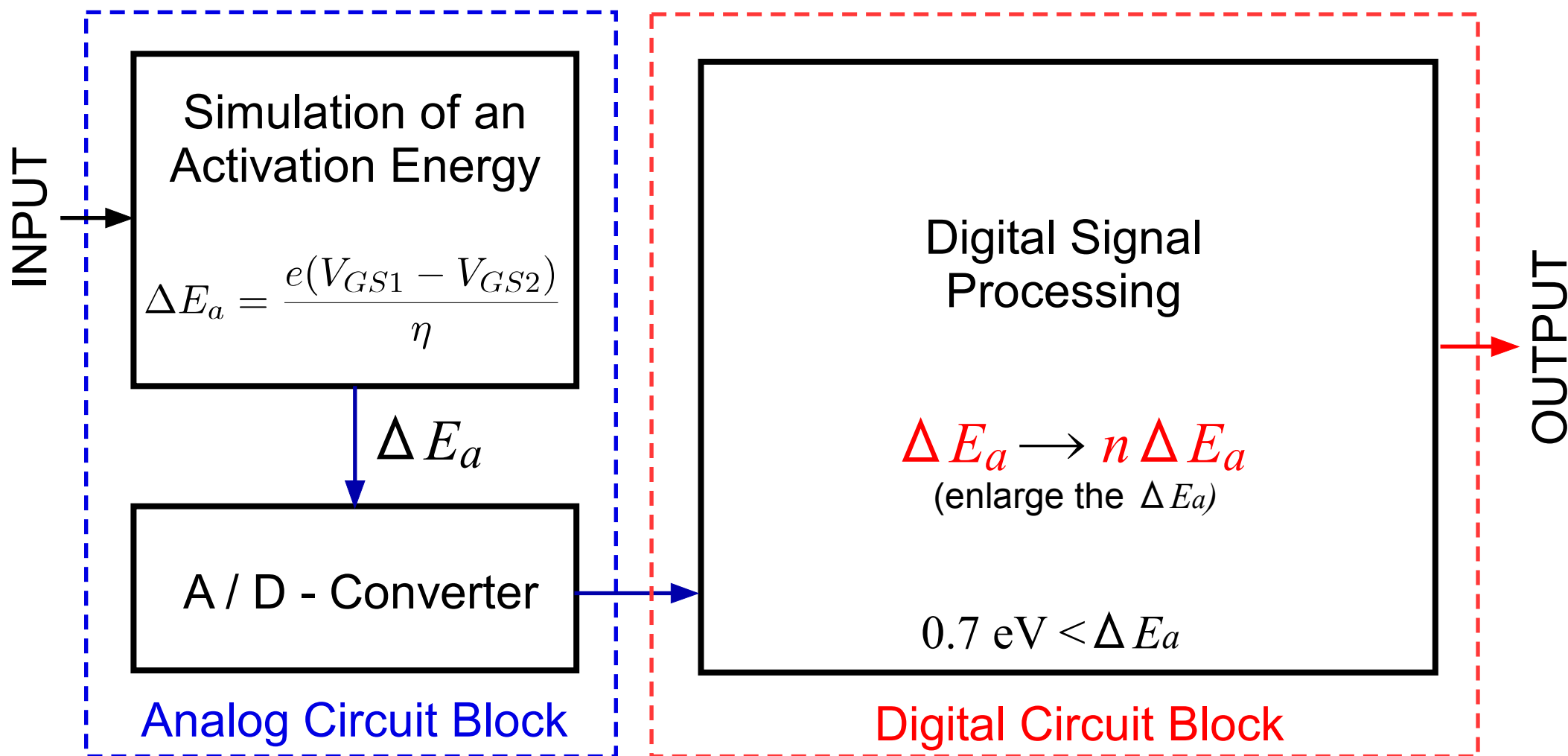
(様々な物質の劣化過程を模擬できない)

⇒ デジタル処理で大きな ΔE_a を模擬する

広範囲な活性化エネルギーの実現

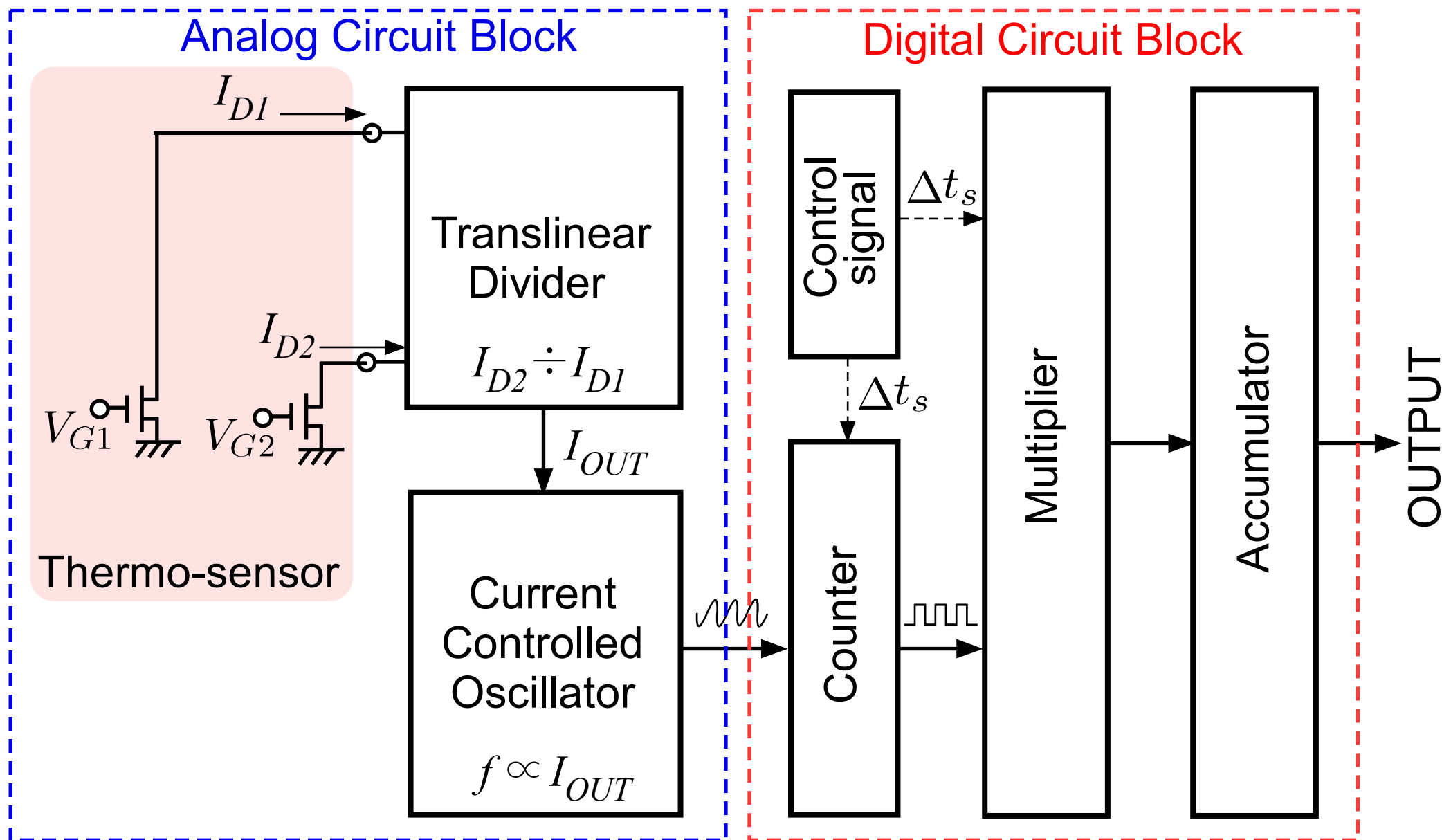
システムLSIワークショップ
2005

Analog and Digital circuit techniques



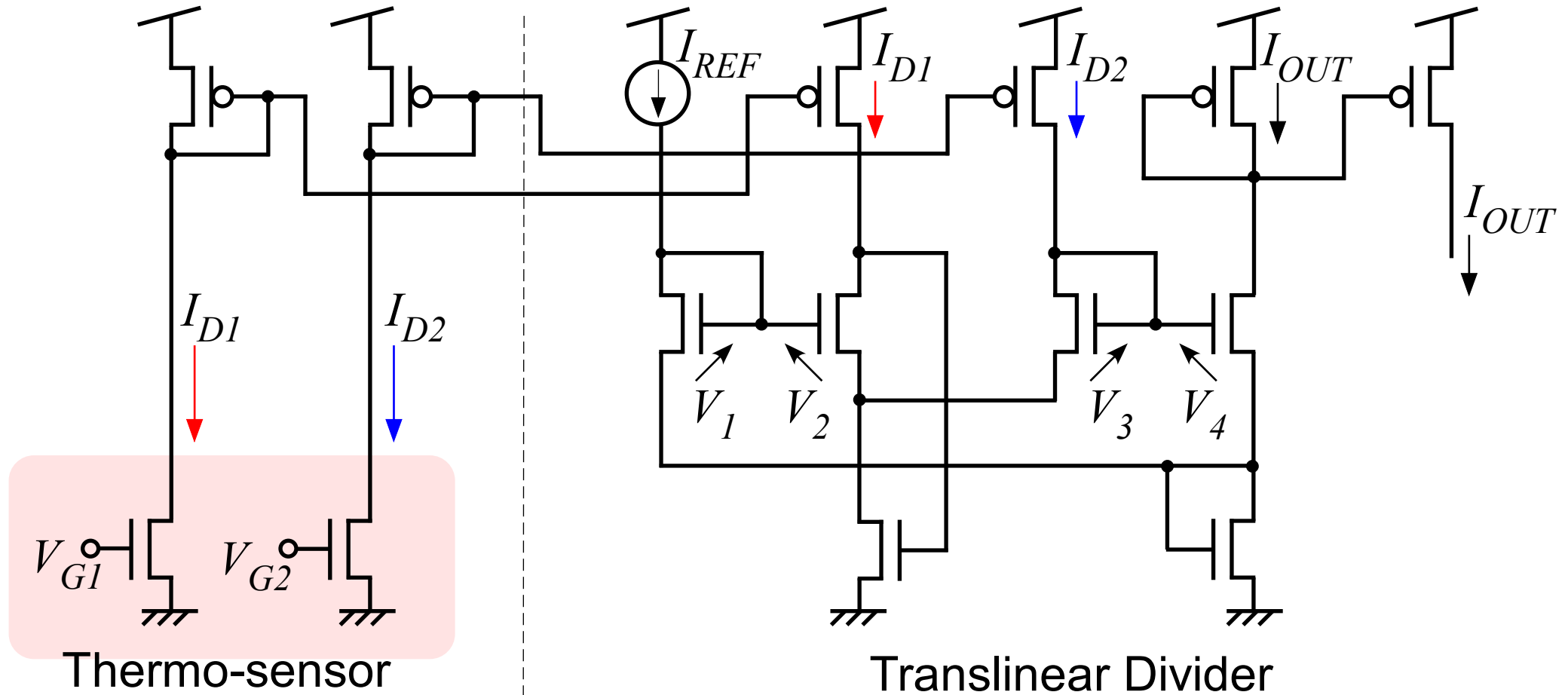
⇒ デジタル処理で $n \Delta E_a$ を模擬する

品質劣化モニタセンサ回路構成



温度センサ・トランスリニア割算器

(物質の劣化過程をサブスレッショルド電流で模擬)



$$\Delta E_a = \frac{e(V_{G1} - V_{G2})}{\eta}$$

$$I_{OUT} = I_{REF} \frac{I_{DS2}}{I_{DS1}} = I_{REF} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right)$$

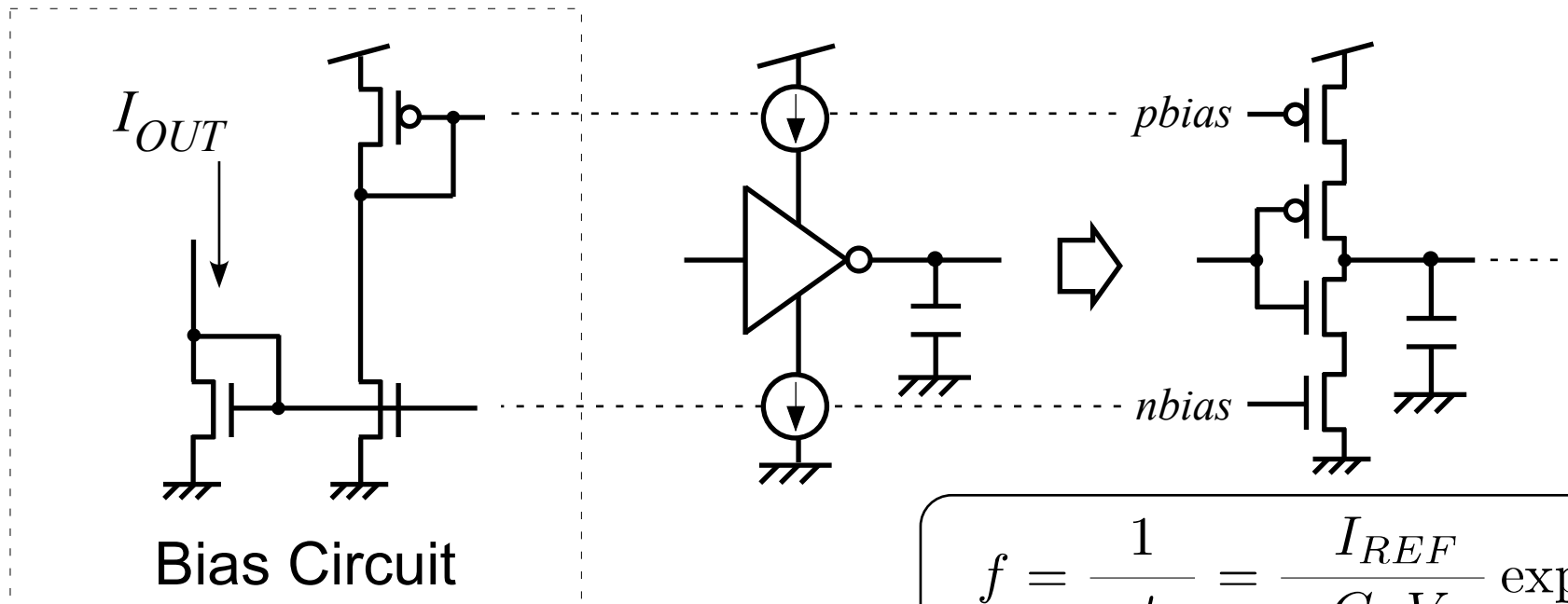
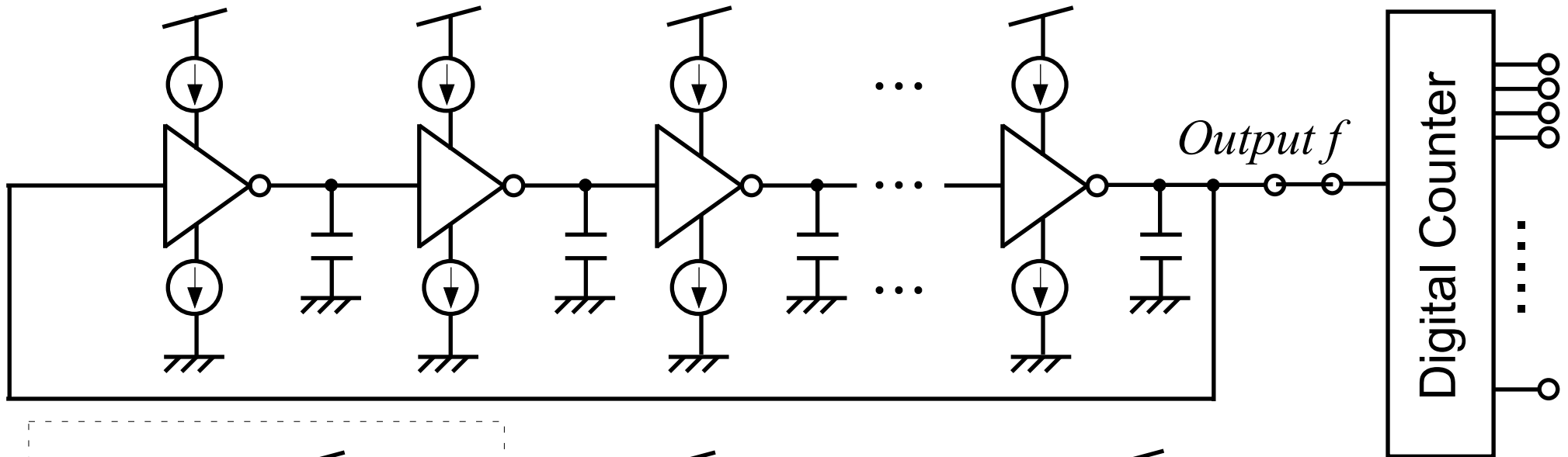
Reference

S.-C. Liu, J. Kramer, G. Indiveri, T. Delbruck, R. Douglas,
“Analog VLSI: circuits and principles”, MIT PRESS, 2002

電流制御発振器

(電流→周波数 変換)

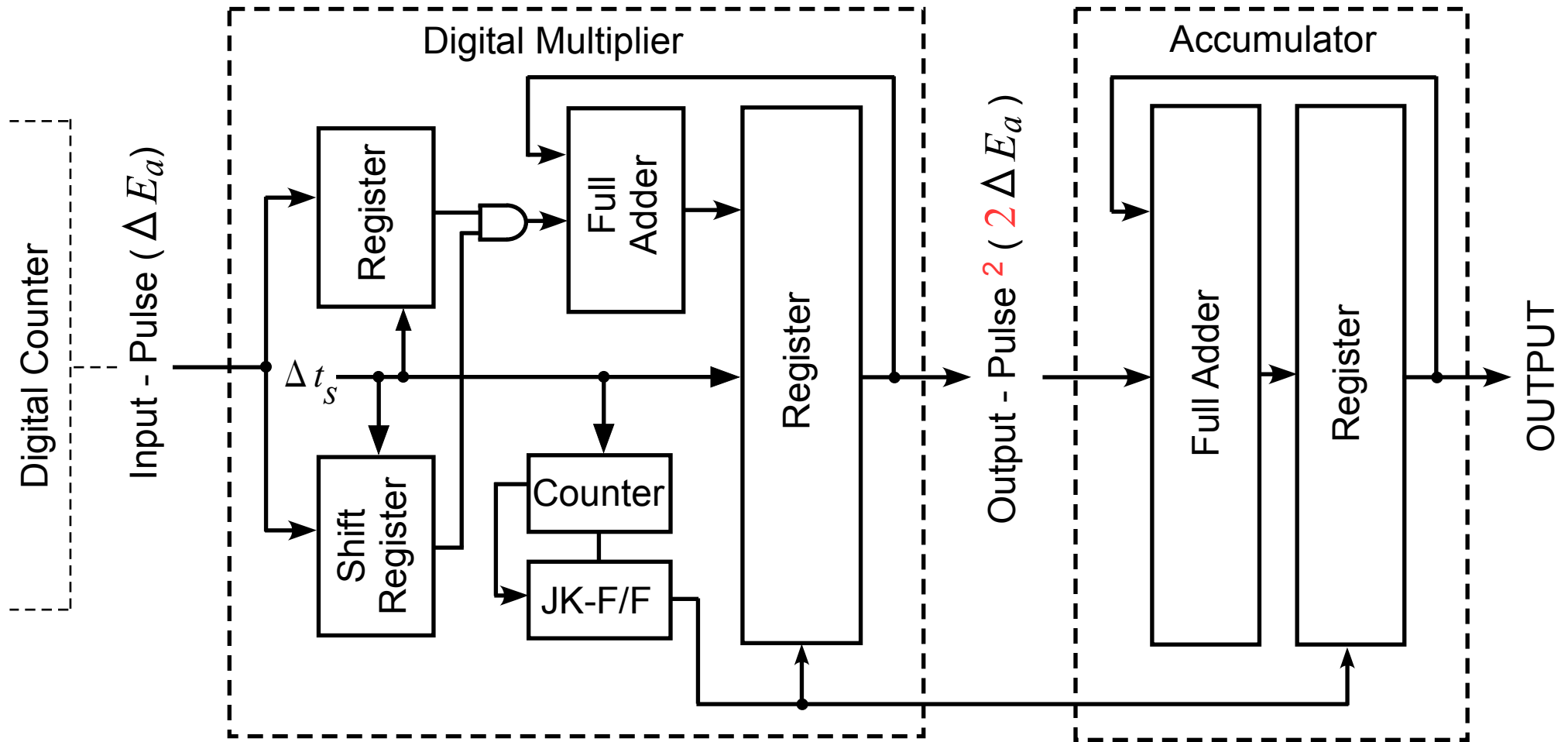
$$\text{Output } f \propto I_{OUT}$$



$$f = \frac{1}{mt_P} = \frac{I_{REF}}{mC_P V_{dd}} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right)$$

乗算器・アキュムレータ

(広範囲な活性化エネルギー(ΔE_a)の実現)

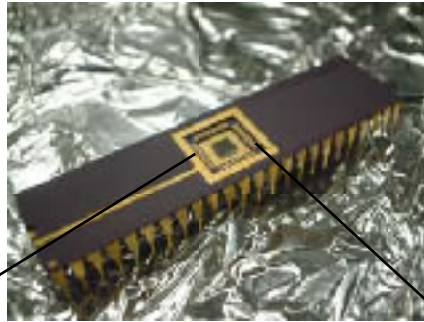


$$f^n = \left(\frac{I_{REF}}{mC_P V_{dd}} \right)^n \exp \left(-\frac{n\Delta E_a}{k_B T} \right)$$

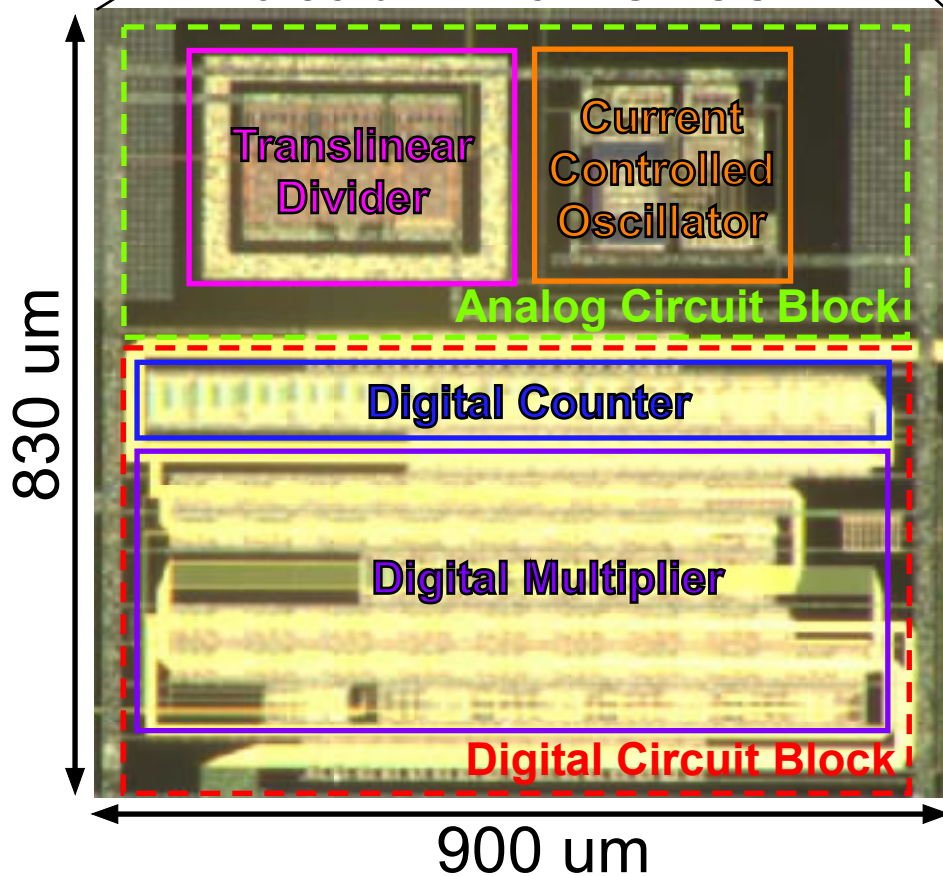
$$\text{Accumulator Output} = \int_0^{t^1} f^n dt$$

試作チップ写真

システムLSIワークショップ
2005



0.35 μm 2P5M-CMOS



測定環境

Thermostatic chamber
SU-241(ESPEC)



Measurement Temperature :
-20 $^{\circ}\text{C}$ ~ 80 $^{\circ}\text{C}$

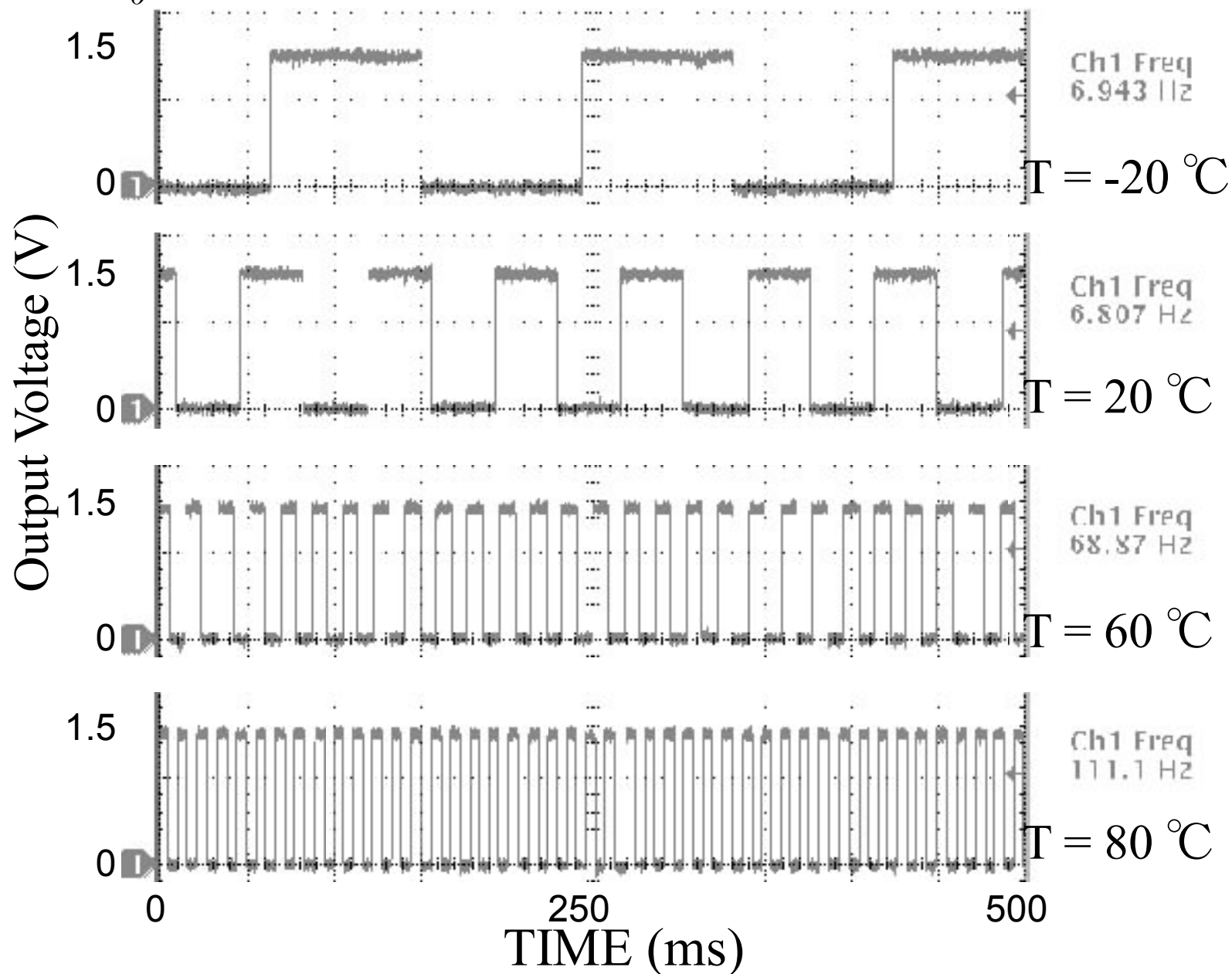
•5 μW @ 1.5 V, 100 $^{\circ}\text{C}$ (Simulation)

ボタン電池容量35[mAh] → 1年2ヶ月~4年の動作可能

電流制御発振器の測定結果

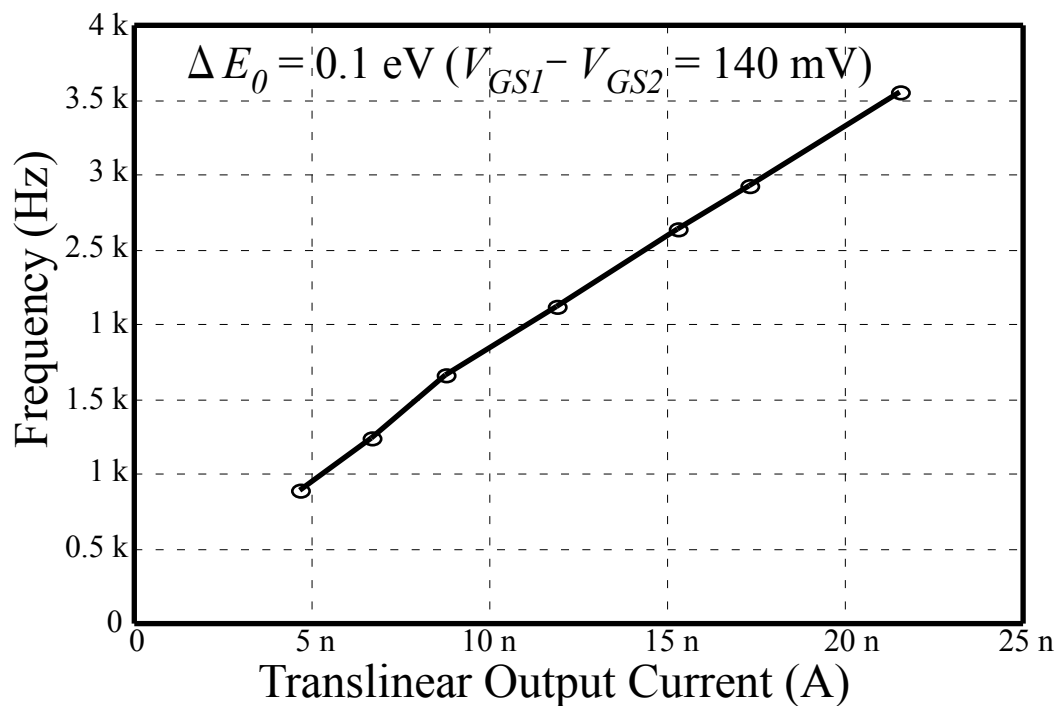
システムLSIワークショップ
2005

($\Delta E_0 = 0.2 \text{ eV}$) 電流制御発振器の出力波形

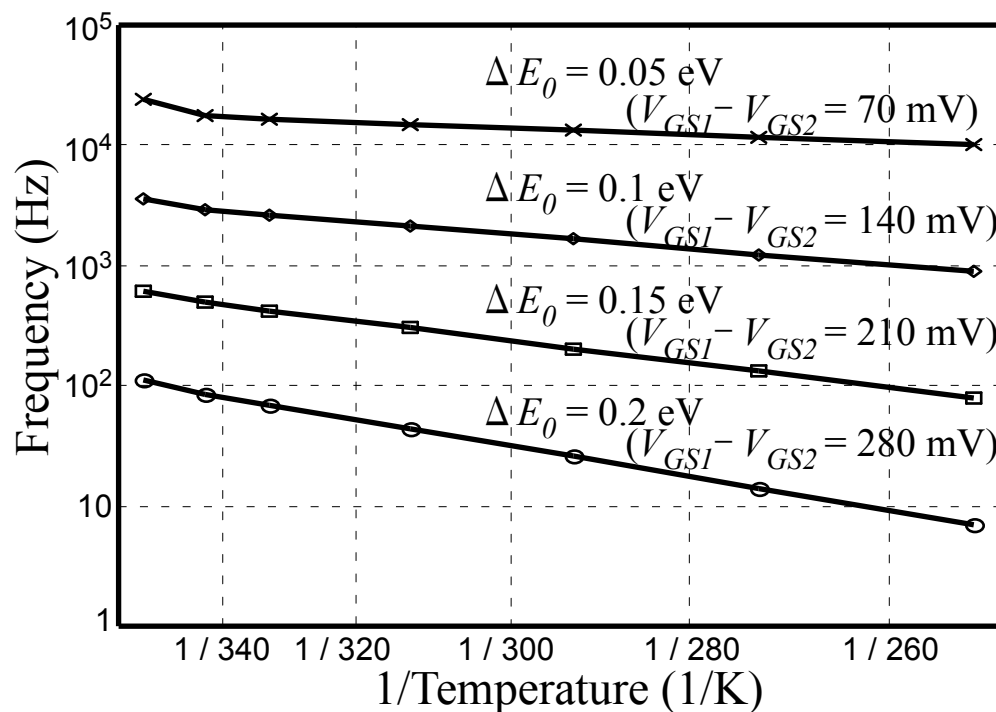


電流制御発振器の測定結果

電流制御発振器の $I - f$ 特性
(横軸はトランスリニア割算器の出力電流)



電流制御発振器の出力周波数



$$\text{Output } f \propto I_{OUT}$$

$$f = \frac{1}{mt_P} = \frac{I_{REF}}{mC_P V_{dd}} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{k_B T}\right)$$

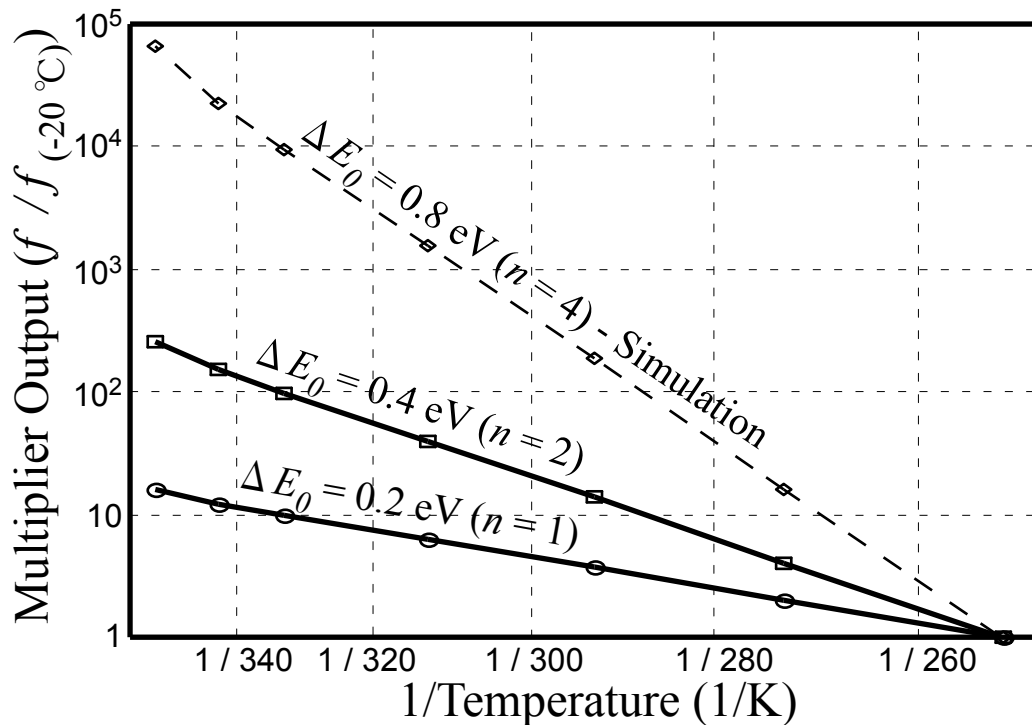
温度センサ・トランスリニア割算器

⇒ $\Delta E_0 = 0.05 \sim 0.2 \text{ eV}$ に設定

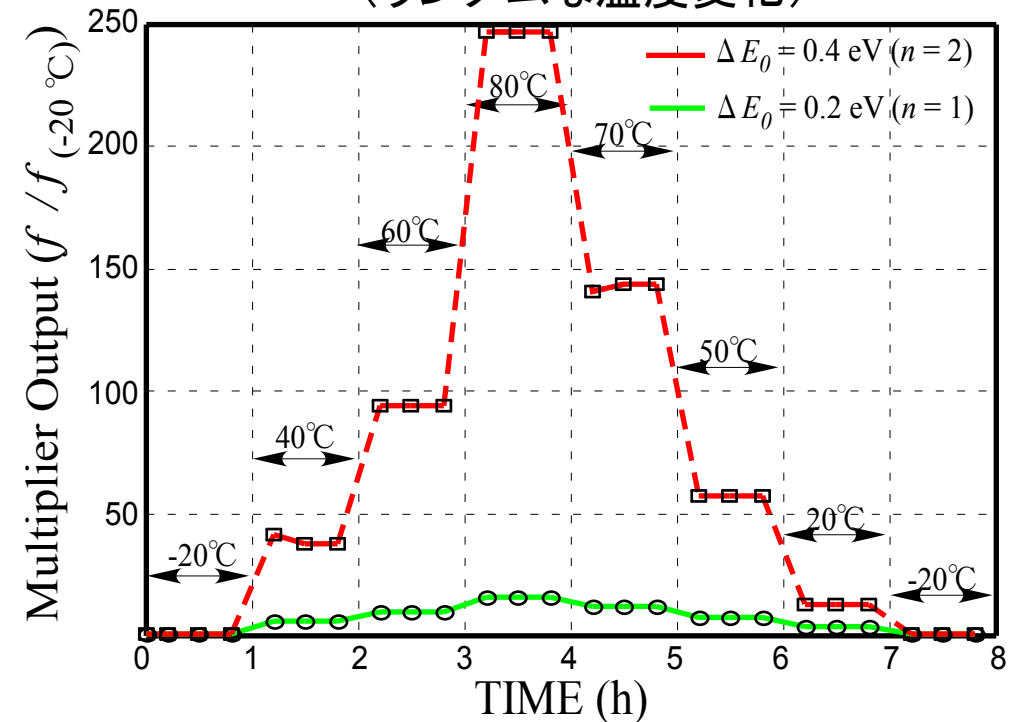
乗算器の出力測定結果

システムLSIワークショップ
2005

デジタル乗算器の出力①



デジタル乗算器の出力② (ランダムな温度変化)



$$f^n = \left(\frac{I_{REF}}{mC_P V_{dd}} \right)^n \exp \left(-\frac{n\Delta E_a}{k_B T} \right)$$

広範囲な活性化エネルギー ΔE_a に対応

⇒ 様々な物質の劣化過程を模擬可能

□ ワイドレンジCMOS品質劣化モニタセンサ回路を設計

・ハードウェア上で物質の劣化過程を模擬

＞ 回路動作の確認；

・プロトタイプチップの測定 ・SPICEシミュレーション

＞ 消費電力；

・5 μ W @ 100 °C – (Simulation)

ボタン電池 (35 mAh) → 約1.2年の連続動作

＞ 活性化エネルギーのワイドレンジ化；

・デジタル信号処理(乗算器)で実現



多くの製品の品質劣化を模擬可能

(生もの、乳製品、医薬品、吟醸酒、高級ワイン、金属のクリープ現象)