

技 術 解 說

半導體素子の 熱抵抗에 關하여(II)

宋 鎮 洙*

<Vol. 27 No. 6 계속>

차

례

V. 過渡熱抵抗

- 1. 過渡熱抵抗의 定義
- 2. 過渡熱抵抗의 測定方法

VI. 放熱板의 選擇과 使用方法

- 1. 放熱板의 選擇方法
- 2. " 使用方法

VII. 結 言

V. 過渡熱抵抗

Switching pulse 回路에서의 接合部溫度 算出은 定常狀態와는 달리 보통의 熱抵抗, case 溫度 등을 適用할 수는 없다. 이 경우 印加 pulse의 時間幅은 發生하는 熱流가 case에 傳達되어 放熱되는 時間에 比하여 아주 짧으므로 接合部 溫度도 같은 power를 定常的으로 印加하는 경우보다 아주 낮다. 이것은 pulse動作의 熱抵抗이 定常狀態의 熱抵抗보다 작은 것을 意味한다. 이때의 熱抵抗을 일반적으로 過渡熱抵抗이라고 하며 switching 回路에서의 出力最大定格을 決定하는 重要한 量이다.

1. 過渡熱抵抗의 定義

過渡熱抵抗은 power의 印加된 時間으로부터 起算하여 어느 時間 후의 接合部 溫度上昇과 印加 power의 比로서 定義된다. 따라서 過渡熱抵抗은 接合部 근방의 熱流에 對한 傳導方程式의 解로부터 구하며 transistor의 構造에 起因하는 物理定數 및 熱的 境界條件에 의해 크게 變하는 것이 보통이다. 이와 같은 問題에 對한 解를 구하는 데는 Mortenson 方法 및 Strickland 方法의 2가지 方法이 있다.

2. 過渡熱抵抗의 測定方法

1) Mortenson¹⁾

內部構造 및 物理定數를 必要로 하는 微視的인 觀點에서 熱傳導方程式의 解를 구하는 方法이다.

collector接合(熱發生部)의 한 쪽은 무한히 긴 1次元의 均質한 Ge 또는 Si이며 다른 한 쪽은 그 終端을 一定溫度 T_s 로 유지하는 均質한 放熱板으로 連結된 成長接合形 transistor를 model로 생각한다. 이와 같은 model은 短時間의 pulse에 對해서는 接合의 兩面이 傳導에 有效하고 長時間의 pulse에 對해서는 한 쪽만이 有效하게 되므로 실제 transistor의 動作境界條件을 나타낸다. 그림 10은 이 model을 圖示한 것이다.

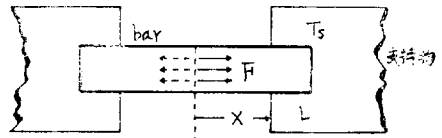


그림 10. Mortenson model의 說明圖

熱源은 平面이고 兩端의 棒의 斷面積은 같다고 가정하여 兩端을 各各 emitter, collector라 생각하면 이때의 熱傳導方程式은

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L \quad t > 0 \quad (30)$$

로 되며, 境界條件은 다음 式으로 된다.

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t}(0,t) = \frac{F}{\lambda} \\ T(L,t) = T_s \\ T(x,0) = T_s \end{cases} \quad (31)$$

여기에서 α : 熱傳搬定數(= λ/c_p)

F : 熱流密度 [W/m^2] = $P/2A$

P : 全 power損失 ($V_c I_c + V_e I_e$)

$P/2 = P'$

(30)式을 境界條件 (31)式으로 解를 구하면

$$T(x,t) = T_s + \frac{P'L}{\lambda A} \times \left[\left(1 - \frac{x}{L}\right) - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{e^{-n^2\pi^2\alpha t}/4L^2}{n^2} \cos \frac{n\pi x}{2L} \right]$$

로 된다.

*正會員: 韓國熱管理試驗研究所

여기에서 $x=0$ 인 接合部의 溫度 $T_j(t)$ 를 구하면

$$T_j(t) = T_s + P\theta_s \left[1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{e^{-t/\tau_n}}{n^2} \right] \quad (32)$$

가 된다. 여기에서 定常熱抵抗 θ_s 는 $L/A\lambda$ 로 나타내며 τ_n 은 $(2L/n\pi)^2 \cdot 1/\alpha$ 로 表示되고 熱時數라 한다. (32)式에서 P' 를 P 로 바꾸고

$$\theta(t) = \frac{T_j(t) - T_s}{P} \quad (33)$$

을 溫渡熱抵抗이라 定義하면 (32)式은

$$\theta(t) = \theta_s [1 - f(t)] \quad (34)$$

단 $f(t) = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{e^{-t/\tau_n}}{n^2}$ 으로 되며 過渡熱抵抗 $\theta(t)$ 는 定常熱抵抗 θ_s 와 같이 一定入力 P 와 $T_j - T_s$ 의 關係를 결부시킨 素子에서의 固有한 量으로 나타낸다.

그림 11은 $1-f(t)$ 를 t/τ_1 의 함수로서 나타낸 것이다

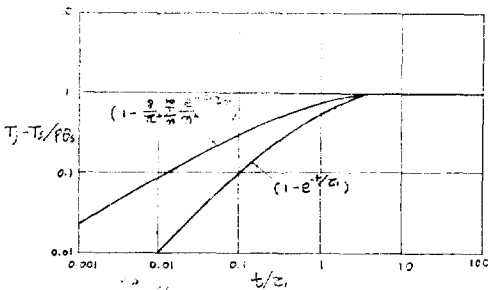


그림 11. $[1-f(t)]$ 의 t/τ_1 에 의한 變化

그림에서 알수 있는 바와 같이 時間 t 가 τ_1 보다 크게 되면 (34)式의 Σ 項은 零이 되어 $\theta(t) \rightarrow \theta_s$ (一定)에서 定常狀態 即 直流動作에 가깝게 된다. 따라서 (33)式에서 定義된 過渡熱抵抗은 定常熱抵抗에 時間이란 次元을 새로이 附加한 것임을 알수 있다.

그림 11에서 過渡狀態와 定常狀態와의 境界는 熱時數 $\tau_1 = (2L/\pi)^2 \cdot S/\lambda$ 에 의해 나누어 진다. 여기에서 S 는 熱容量(= $c\rho$), λ 는 熱傳導率이며 τ_1 은 素子の dimension 및 熱的 物理定數에 의해 一義的으로 決定되며 S 의 경우 $L=200\mu$ 이면 $\tau_1 = 1.82 \times 10^{-4}$ [sec]임을 알수 있다. 또 $0 \leq t/\tau_1 \leq 2.0$ 사이에서는 $f(t)$ 는 log-log graph 위에서 直線으로 나타남으로 接合溫度는 近似的으로 $T_j(t) = T_s + P\theta_s \sqrt{t/2\tau_1}$ 으로 나타내며 時間의 乘에 따라 增加한다. 그러나 이러한 현상은 效熱棒이 無限히 크고 그 온도가 항상 T_s 인 경우에만 成立하며 實際의 問題에서는 放熱棒은 無限大의 熱容量을 갖지 않으므로 放熱棒과 周圍와의 사이에 熱過渡現象이 생겨 아주 長時間을 지나도 定常이 되기 전에는 T_j 는 一定

치 않다. 따라서 通常 반복되는 pulse 動作에서는 放熱棒을 一定 溫度라 생각하여 Ge 또는 Si片 가운데에서 단 일어나는 過渡現象이라 생각하는 것이 좋다. 이것은 放熱棒과 周圍와의 사이의 熱時數가 半導體材料인 Ge, Si 등의 τ_2 에 比하여 아주 크므로 pulse 動作에서는 直流動作의 경우와는 달리 case와 周圍 사이의 熱抵抗을 고려치 않아도 된다는 것을 意味한다.

以上과 같은 Mortenson의 方法은 素子の 構造에서 가장 適合하다고 생각되는 熱的 境界條件으로 熱傳導方程式의 解를 구하는 方法이다. 따라서 alloy形, mesa形, 出力形 등과 같이 境界條件이 다른 경우는 얻을 수 있는 結果도 各各 달라짐을 豫想할 수 있다.

過渡熱抵抗의 測定은 原理的으로는 pulse法에 의한 熱抵抗測定方法과 同一하다. switch S_1 과 synchro하게 調整된 다른 電子 switch를 선지하고 이 switch를 on off시켜 그 off時 parameter I_{CEO} , V_{EB} , V_{CBF} 등을 測定하며 그 溫度依存性으로 부터 T_j 를 決定하는 方法이 일반적이다.

그림 12는 이 方法에 의해 얻어진 過渡熱抵抗의 測

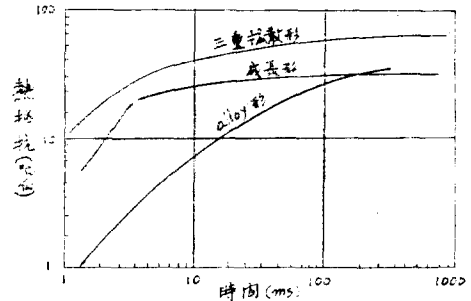


그림 12. 過渡熱抵抗의 測定例

定例이다. 그림에서 成長形 transistor는 Mortenson의 理論처럼 時間의 $1/2$ 乘에 比例하여 $\theta(t)$ 가 증가하고 그 후 緩和하며 mesa形도 이와 비슷한 傾向을 나타내나 alloy形은 일반적으로 時間이 짧은 部分에서 $1/2$ 乘보다 急峻하게 溫度가 上昇한다. 이것은 Mortenson의 境界條件이 成立되지 않는 例로서 素子固體의 兩端이 斷熱되고 그 中央에 發熱面이 있는 alloy形 model로서 說明된다.²⁾ 그러나 alloy形은 成長形에 比하여 熱抵抗의 絕對值가 낮기 때문에 實用上 그 時間變化는 問題되지 않는다.

2) Strickland³⁾ 方法

이 方法은 transistor의 熱過渡現象을 完全히 電氣過渡現象과 對比시켜 RC回路網과 類似한 等價回路로 置換하여 transistor의 熱構造를 巨視的으로 把握하는 方

法으로서 素子の 内部構造, 物理定數 등의 知識이 不必要하므로 主로 回路擔當者에게 有用하다.

表 3은 熱系와 電氣系間의 等價關係를 나타낸 것으

表 3 熱系와 電氣系의 等價關係

| 電 氣 系 | 熱 系 |
|-----------|-----------------------------|
| V 電 壓 [V] | T 溫 度 [°C] |
| I 電 流 [A] | P 電力損失 [W] |
| R 抵 抗 [Ω] | θ 熱 抵 抗 [°C/W] |
| C 容 量 [F] | C _θ 熱 容 量 [J/°C] |

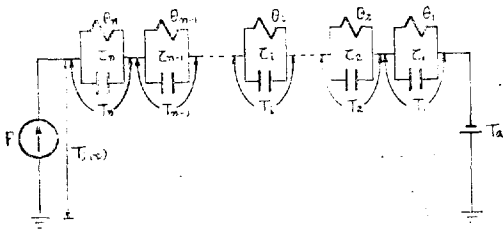


그림 13. Tr의 過渡熱等價回路

로서 이 경우 電氣系回路는 RC分布定數回路를 이루며 Foster-Cover의 定理에 의해 並列 RC pair의 直列接續表示가 가능하다. Strickland는 熱系에 對해 위의原理를 適用시켜 그림 13과 같은 等價回路를 提案하였다 여기에서 $T_j(t)$: collector接合과 周圍와의 溫度差로서 時間의 函數

T_a : 一定한 周圍溫度를 나타내는 Battery 이다.

그림 13은 transistor의 過渡熱抵抗 $\theta(t)$ 를

$$\theta(t) = \sum_{i=1}^n \theta_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (35)$$

에 의해 近似되는 것을 意味한다. $t=0$ 에서 電力 P가 印加되면 그 溫度 T_j 는 앞의 定義에 의해

$$T_j = \sum_{i=1}^n P \theta_i (1 - e^{-t/\tau_i}) + T_a \quad (36)$$

이다. T_j 가 定常值에 도달할 때에는 各部分의 溫度 T_i 도 定常值 T_{i0} 에 도달하고 $T_{i0} = P \theta_i$ 로 된다. 따라서 定常值에 도달하고 부터 電力 P를 off하면 그후의 溫度 冷却曲線은

$$T_j - T_a = \sum_{i=1}^n T_{i0} e^{-t/\tau_i} \quad (37)$$

로 된다.

Strickland의 表示 θ_i , τ_i 는 冷却曲線式 (37)式을 semilog graph에 圖示하여 그 切片과 勾配로부터 順次的으로 구할 수 있다.

3) 連續式測定法⁴⁾

Base 端子를 開放하여 C-E 逆方向에 高電力을 印加하고 그 V-I曲線으로부터 熱抵抗 θ 를 구하는 方法이다. 일반적으로 Si transistor에서는 base開放C-E 逆方向特性은 그림 14에 나타난 바와 같이 電壓의

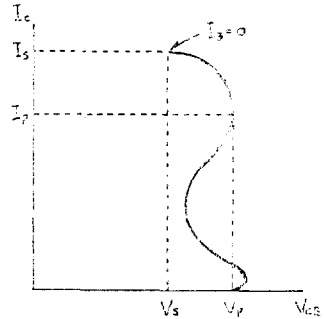


그림 14. Si Tr의 base 開放 $I_C - V_{CBO}$ 特性

peak值 V_p 가 高電流領域에 나타난다. 이 peak值는 transistor를 構成하는 S_i 의 比抵抗이 power印加에 따른 溫度上昇에 의해 最大로 增加된 點에서 發生點에서 發生된다. 比抵抗 增加가 發生되는 溫度는 比抵抗의 값에 의해 달라지므로 比抵抗과 溫度와의 關係를 graph化하여 실제에 應用한다.

VI. 放熱板의 選擇과 使用方法

1. 放熱板의 選擇方法⁵⁾

가. 放熱板의 表面積과 熱抵抗

半導體素子에서 發生되는 熱은 放熱板金屬을 通하여 表面에 傳達된다. 放熱板 表面으로 부터 周圍空氣로의 熱放散은 主로 對流에 의한 熱傳達이므로 表面積과 溫度差에 比例하며 放熱板 附近에서의 空氣의 移動速度에 의해 大幅 變化한다. 放熱板의 熱抵抗은 일반적으로 自由空間에서 수직方向, 自然對流에서 使用할 경우로서 表示된다. 自然對流의 空氣流는 使用時의 溫度에 의해서도 약간 變化하기 때문에 熱抵抗의 크기도 變化하나 그 값은 대개 1cm^2 당 $1.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C/W}$ 정도이다. 強制空冷인 경우는 自然對流의 값보다 2~3倍 정도 增加한다. 그림 15는 放熱板의 熱抵抗과 表面積과의 關係이다.

나. 放熱板의 材料

放熱板으로 使用되는 材料로서는 높은 熱傳導率을 가진 銅이 가장 좋은 冷却效果를 얻을 수 있다. 그러나 比重이 높기 때문에 重量이 무겁고 高價이다. 이에 비해 Al은 熱傳導率은 銅보다 약간 떨어지나 比重이 銅의 約 $\frac{1}{3}$ 정도로 가볍고 機械加工도 良好하므로 現在

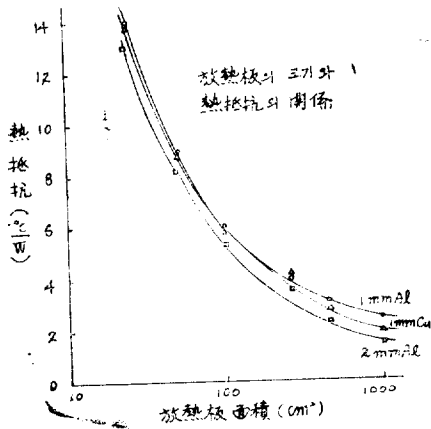


그림 15. 放熱板의 크기와 熱抵抗의 關係

表 4. Al板 Cu의 特性比重

| | Al | Cu |
|-------------------|------|------|
| 比 重 | 2.71 | 8.96 |
| 熱傳導率[cal/cm·S·°C] | 0.49 | 0.92 |
| 熱膨脹率[ppm/°C] | 24 | 17 |

放熱板으로 가장 많이 使用되고 있다. 그러나 溫氣 또는 부식성개스 분위기에서는 腐食이 생겨 接觸部를 침범하여 熱抵抗이 增加되는 缺點이 있다. 表 4는 Al과 銅의 特性比較表이다.

다. 放熱板의 機械加工

放熱板으로 現在 많이 使用되고 있는 것은 押出加工된 Al을 적당한 크기로 切斷한 것과 Al板을 press 加工한 두 종류가 있다. 이 放熱板에 半導體 取付用의 구멍을 뚫는 加工을 하며 이러한 加工을 하며 이러한 加工은 半導體素子와 放熱板과의 接合을 良好하게 하기 위한 加工후의 平滑度가 중요한 역할을 한다. 即 加工時 突起 또는 scratch가 생기면 熱傳導가 不良하게 되고 絶緣板이 破損되어 電氣絶緣이 不良하게 되므로 주의해야 한다.

라. 表面加工

表面加工은 放熱板의 scratch 등을 없애고 外觀을 良好하게 하기 위한 梨地加工 및 腐食을 防止하기 위한 加工輻射에 의한 熱放散效率를 向上시키기 위해 放熱板을 黑色 또는 어두운 색으로 染色하는 染色 加工등이 있다.

마. 放熱板의 種類

放熱板은 形狀에 따라 能力形 放熱板, compact形放熱板, 機能形 放熱板, 組合形 放熱板 등으로 分類되며 放熱對象의 形態, 目的에 따라 選擇이 달라진다.

2. 放熱板의 使用方法

가. 必要放熱量

放熱板의 크기를 決定하기 위해서는 우선 transistor의 發生熱量을 決定할 필요가 있다. 따라서 collector 損失이 얼마인가를 알고 이때 base溫度를 決定한다. 일반적으로 collector 許容損失은 室溫 25°C일 때의 값이며 周圍溫度가 높아지면 減少한다. 周圍溫度가 許容最高接合部溫度 T_{jM} (Ge TR : 95°C, S, TR : 150°C)에서는 許容損失은 0이다.

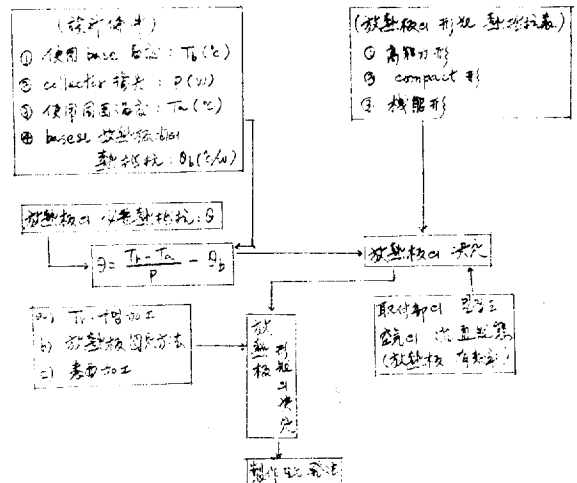
나. 周圍溫度

周圍溫度란 放熱板을 收容하고 있는 case內의 溫度이므로 이 溫度를 決定하기 以前에 電子機器가 使用되는 室溫(外氣溫度일 경우도 있다)을 검토할 필요가 있다. 通常 한여름의 室溫은 40°C로 보면 充分하지만 太陽의 直射光線을 받는 경우는 50°C 以上일 경우도 있다. 이 室溫의 空氣가 case內에 들어가 冷却을 시키므로 case溫度는 室溫보다 높게되며 그 平均 溫度를 室溫보다 10°C 높다고 假定하면 이 條件을 유지하기 위해 case 內부의 全發生熱 10W當 每分 17,000cm³의 空氣吸込이 必要하다. 그러나 近來 各광받고 있는 自動車部品으로서의 半導體素子인 경우 地上의 溫度와 engine room 溫度를 감안한 -30°C~120°C의 溫度 cycle에 對한 耐久性이 要求되므로 特殊한 熱設計를 必要로 하고 있다.⁶⁾

다. 放熱板의 必要表面積

特異한 形狀의 放熱板을 제외하면 表面積 1cm², 周圍와의 溫度差 1°C 當 約 1×10⁻³W/cm²·°C의 熱量이

表 5. 放熱板의 決定方法



放熱板으로 부터 放出되므로 collector 損失과 放熱板의 溫度를 決定함으로써 概算된다.

라. 放熱板의 決定方法

表 5는 放熱板을 決定하는 順序이다. 使用 base溫度 T_b 와 collector 損失 P , 使用時의 周圍溫度 T_a 및 半導體와 放熱板間의 熱抵抗 θ_b 로 부터 必要熱抵抗을 算出하여 放熱板形狀을 決定할 수 있다.

VII. 結 言

지금까지 半導體素子の 熱의 特性을 transistor를 中心으로 記述하였으나 여기에서 언급되지 않은

1) 集積回路的 熱設計

2) computer로 應稱되는 情報處理用 機器 등 裝置의 熱設計

에 關한 調査, 研究의 補充이 必要하다.

最近 熱設計에 關한 세계적인 추세는 情報處理用 機器에서 情報處理速度의 向上을 위한 消費電力의 增加와 裝置의 小形化를 위한 部品の 高集積度때문에 야기

되는 熱的 問題點의 解決에 많은 관심^{7,8)}이 集中되고 있으므로 수년內 急進的인 發展이 豫想되는 國內 半導體製造業界에서도 製品の 高級化, 高集積化, 高信賴度를 위해 熱設計에 關한 보다 幅넓은 研究가 있어야 할 것으로 思料된다.

參 考 文 獻

- ① K.E. Mortenson : Proc. IRE, Vol. 45. p. 504~513. April. 1957.
- ② 高橋 etal : 日通信學會誌 Vol. 48. p. 1657~1665 Oct. 1965.
- ③ P.R. Strickland : IBM Journal. Jan. 1959.
- ④ B. Reich : Proc. IEEE Vol. 53. p. 624-625 June 1965
- ⑤ 大坪 : 電子技術 Vol. 8 No.4. p. 22~25. 1966
- ⑥ 高橋 : 電子技術 Vol. 17, No. 12, p. 38, 1975.
- ⑦ 森川 : 電子技術 Vol. 12, No. 12, 1970.
- ⑧ 岩上, 森田 : 電子材料 p. 139~144. 1977年 1月