

LDMOS 在正常开关工作下的瞬态热效应*

李梅芝[†] 郭 超 陈星弼

(电子科技大学微电子与固体电子学院, 成都 610054)

摘要: 利用热等效电路对外加连续脉冲产生的热效应中晶格温度的上升及下降作了研究并与实验进行了比较. 结果表明, 若高频脉冲的延迟时间大于降温驰豫时间, 则器件处于热安全工作区. 对热阻为 3.5K/W , 热容为 $5\mu\text{s} \cdot \text{W/K}$ 的 LDMOS, 如脉冲频率小于 7.14kHz 且占空比为 0.5 , 或脉冲频率为 10kHz 且占空比小于 0.3 , 则该器件工作在热安全区. 文中还给出了功率器件热安全工作区的判据.

关键词: 热路模型; 公式; 降温; 热缓慢击穿

EEACC: 2560R

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)11-1989-05

1 前言

近几十年来, 随着集成电路的快速发展, 所有的电路都依赖于一个高效的电源, 因此开关电源成为目前常用的电源. 开关电源朝高频化发展, 开关速度提高很快, 带来体积小和重量轻等优点. 在开关运用中, 分析器件内部热^[1]产生的升温过程及热耗散的降温过程直接关系到器件是否处于安全工作区, 以及如何更好地提高开关电源的效率, 已经成为非常重要的问题.

研究器件或 IC 的热瞬态效应等工作越来越多^[2~8], 但这些工作都是分析晶格温度上升或稳态的过程^[2,6~8], 没有详细分析晶格温度下降过程, 更没发现全面研究连续脉冲信号作用时晶格温度与时间关系的文献资料. 因此, 还不能够精确预测电热效应全过程中器件内部的热传导及温度变化等行为, 尤其是高频开关器件在正常开关工作下的瞬态热特性, 例如此时器件是处在热安全工作区或是发生了热缓慢击穿, 这种对器件乃至整个芯片或电路模块都非常重要的问题还缺乏分析. 所谓热缓慢击穿, 是指第一个周期安全工作的高频开关, 若脉冲频率过高或占空比过大, 则经过足够多的开关周期后, 温度会缓慢上升直到令器件或芯片发生永久性的热烧毁. 本文以广泛应用于智能功率集成电路 (smart power integrated circuit, SPIC) 输出级中的 LDMOS 器件为例, 通过分析热路模型推导出连续脉冲信号作用时器件内部晶格温度的变化规律公式, 对

热缓慢击穿现象给出了一个解释, 并对比实验结果^[6,7]证明其合理性.

2 LDMOS 的结构及其等效热路

图 1(a) 所示器件是普通 SPIC 中的 LDMOS, 其漂移区由 n-epi 构成, 表面漏极 drain 通过重掺杂的 n-sink 和埋层 n-bury 连通, 沟道由双扩散形成, p-body 通过欧姆接触 p^+ 和源 n^+ 短接; 假设衬底厚度为 $200\mu\text{m}$; 半导体的背面为热沉, 其晶格温度恒定为 300K .

对于功率晶体管^[1], 器件内部热源处的温度高于其他地方的温度, 热能就会向周围温度低的地方传导. 在稳态时, 任何两个面之间有温差 ΔT , 则单位时间内在这两面间传导的热量即功率 P_c 与温差 ΔT 成正比:

$$P_c = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (1)$$

式中 R_{th} 是热阻. 上式与电路中的公式 $I = V/R$ 相似, P_c 相当于 I , ΔT 相当于 V , R_{th} 相当于 R , 故用热路来描述热传导, 使等效热路中各量之间的关系和电路中原理相似, 较为方便. 在瞬态时, 等效热路不但要考虑热阻, 而且还要考虑热容, 热容相当于电容.

由上所述可知, 对于图 1(a) LDMOS 来说, 当器件内部某处 (如漏区附近) 形成热源 P 时, 该处温度高于其他区域, 热能会向衬底和源区传导. 在稳态工作时, LDMOS 器件区每一位置无限小长度 dl 内

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60476036)

[†] 通信作者. Email: hanli@uestc.edu.cn

2006-04-07 收到, 2006-05-24 定稿

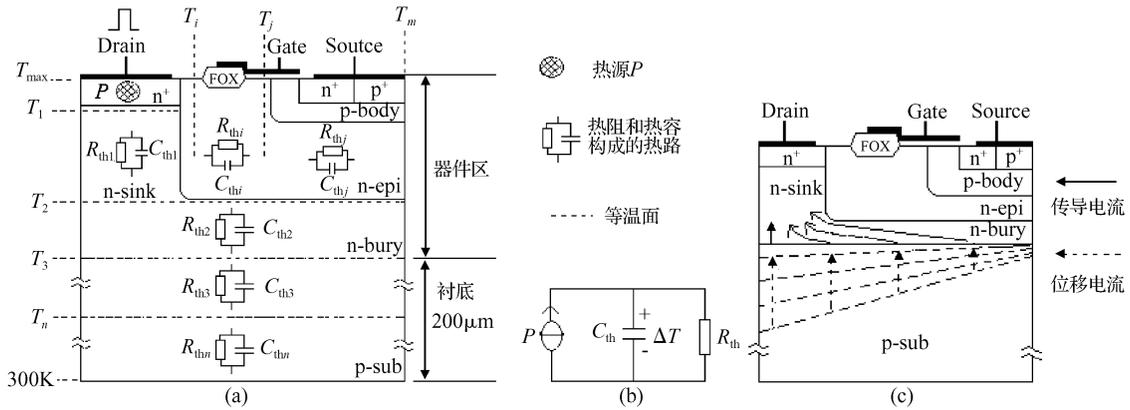


图 1 LDMOS 的结构和热传导(a)、等效热路(b)和瞬态工作时的位移电流和传导电流示意图(c)

Fig. 1 (a) Structure and equivalent electrical circuit of thermal behavior of LDMOS; (b) Simplified equivalent circuit of (a); (c) Schematic view of displacement current and conductive current of LDMOS during transient process

部的功率密度是 $dP_c = J_{con}^2 \times R_{spec} \times dl$, 其中 J_{con} 是垂直于电流方向单位面积的传导电流, R_{spec} 是方块电阻. 如忽略各处电阻的不同, 则器件每一截面有几乎相同的热源. 从而可以不考虑热阻热容的分布参数, 而当成集总参数. 在瞬态工作时, 随着外加脉冲的变化, 器件的耗尽层不断收缩或扩张, 耗尽层的位移电流在器件有源区转化为传导电流集中到漏极, 如图 1(c) 所示. 从而漏极附近有最大的热源功率, 影响着等温面的动态分布, 器件有源区内的等效热路不能作为热阻热容的集总参数. 但是, 文献[5]研究同一器件结构时表明, 当器件在异常情况下处于 npn 管触发区和负阻区时有源区最高晶格温度分别为 708 和 832K 时, 对应的器件有源区最高和最低晶格温度差值分别为 14 和 21K, 远小于器件区最低温度与衬底 300K 的温差(394 和 511K), 越远离器件有源区的地方如衬底区, 等温线就越趋于平行半导体表面^[2,5], 而器件在正常开关工作下处于较低的温度范围, 再加上器件区的宽度和厚度 ($\leq 10\mu\text{m}$) 远小于衬底厚度 ($\approx 200\mu\text{m}$), 故本文忽略开关瞬态工作时器件有源区的温差, 从而将器件有源区和衬底区的热路近似当做集总参数. 如沿垂直半导体表面方向, 可以等效为多个 $R_{thy}C_{thy}$ ($y = 1, 2, 3, \dots, n$) 的热路串联; 而沿平行半导体表面方向, 同样可以等效为多个 $R_{thx}C_{thx}$ ($x = i, j, \dots, m$) 的热路并联; 而最终可以简化为图 1(b) 所示的热路, 各量之间的关系和电路中原理相似. 当器件有外封装或散热片时, 则需要考虑外封装或散热片的热阻和热容. 功率器件热学和电学性质之间的关系虽然非常复杂, 但因热的瞬态反应比电的瞬态反应慢^[5], 故可以忽略电的瞬态反应时间, 把外加电脉冲当做热源的来源, 重点分析热的瞬态特性. 该思想也可用于其他结构或类型的晶体管或芯片.

3 热安全工作区和热缓慢击穿现象的分析

由上可知, 器件内部可以等效为图 1(b) 所示热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 构成的热路, 两者的乘积即是热时间常数 $\tau_{th} = R_{th} C_{th}$, 代表热反应的快慢或速度. 当 R_{th} 和 C_{th} (即 τ_{th}) 确定后, 就可以根据外加脉冲产生的热源功率和初始条件得到晶格温度与时间的关系.

第一, 当 LDMOS 在单脉冲信号作用时, 升温过程和降温过程分别类似 RC 电路的零状态响应和零输入响应^[9], 如图 2 所示. 由公式(1)可得升温公式(2)^[8]和降温公式(3):

$$\Delta T_{rise}(t) = T(t) - 300 = R_{th}(T) \times P(t) \times (1 - e^{-t/\tau_{th}(T)}) = R_{th}(T) \times V(t) \times I(t) \times (1 - e^{-t/R_{th}(T)C_{th}(T)}), \quad t \geq 0 \quad (2)$$

$$\Delta T_{fall}(t) = T(t) - 300 = (T_0 - 300)e^{-t/\tau_{th}(T)} = \Delta T_0 e^{-t/R_{th}(T)C_{th}(T)}, \quad t \geq 0 \quad (3)$$

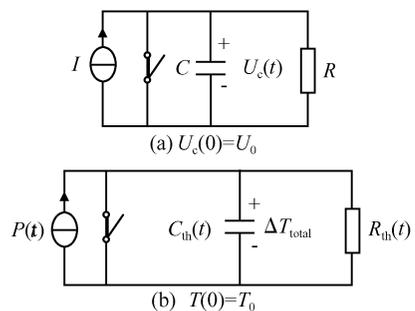


图 2 RC 电路(a)和热路(b)示意图

Fig. 2 Schematic view of electric circuit (a) and thermal circuit (b)

公式(2)表示在 t 时刻器件某位置晶格温度 $T(t)$ 的上升值 ΔT_{rise} , 与 t 时刻该位置的功率 $P(t) = V(t) \times I(t)$ (即电压 $V(t)$ 与电流 $I(t)$ 的乘积, 代表热源) 成正比; 当 t 远远大于 $\tau_{th}(T)$ 时, ΔT_{rise} 会趋向于稳态值, 即晶格温度会趋于稳态值, 此时简化为公式(1). 其物理过程是半导体开始从 300K 升温, 最终达到空间和时间上的稳态分布, 其实质是热路中热容的贮能从无到有的过程, 类似于电流源给电容充电的过程. 公式(3)中的 T_0 表示降温开始的 t_0 时刻的晶格温度(可将 $t = t_0$ 代入公式(2)求出 T_0); 当 t 远远大于 $\tau_{th}(T)$ 时, ΔT_{fall} 会趋向于零, 即晶格温度会趋于 300K. 其物理过程是半导体开始从初始温度 T_0 降温, 最终各处都下降到 300K, 其实质是热容的贮能有到无的过程, 类似于电容放电的过程.

第二, 当 LDMOS 在连续脉冲信号(如重复开关模式)作用时, 温度变化类似 RC 电路的零状态响应和零输入响应(即完全反应^[9])的叠加定理, 如图 2 所示. 于是将升温公式(2)^[8] 和降温公式(3)叠加得到公式(4):

$$\begin{aligned} \Delta T_{total}(t) &= \Delta T_{rise}(t) + \Delta T_{fall}(t) \\ &= R_{th}(T) \times V(t) \times I_{pulse}(t) \times \\ &\quad (1 - e^{-t/\tau_{th}(T)}) + \Delta T_0 e^{-t/\tau_{th}(T)}, \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

由(4)式可知, 器件在连续脉冲信号作用下, 不断地进行着“周期性升温-降温-升温”的重复过程, 其实质是热容的贮能不断“增加-减少-增加”的循环过程, 类似于电容周期性“充电-放电-充电”的循环过程. 我们感兴趣的是: 在器件“周期性升温-降温-升温”的过程中, 晶格温度的变化是否给器件带来不良影响.

一般文献采用热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 的乘积 $\tau_{th} = R_{th} C_{th}$ 代表热反应的快慢. 如图 3 所示, 假设器件内部降温时已达稳态时的最高初始温度 T_0 , 降温结束时器件内部各点温度都是稳态值 300K, $\Delta T = T_0 - 300$. 则当 $t = 4\tau_{th}(T)$ 时, 晶格温度与 300K 相差仅

为 ΔT 的 1.83%. 这里特别定义一个降温弛豫时间 $\tau_{fall}(T)$, 当 $t = \tau_{fall}(T)$ 时, 晶格温度与 300K 相差为 ΔT 的 0%, 即 $\tau_{fall}(T)$ 是指从 T_0 降温到器件内部各点温度都达到稳态值 300K 所用的时间, 表示热耗散的降温过程所经历的全部时间, 如图 3 所示. 故 $\tau_{fall}(T)$ 比 $4\tau_{th}(T)$ 略大, 本文暂认为 $\tau_{fall}(T) \approx 4\tau_{th}(T)$, 这对初步估算器件的热安全工作区有用. 同理, 升温弛豫时间 $\tau_{rise}(T)$ 表示升温过程所经历的全部时间.

高频开关器件连续工作时, 器件将进行“周期性升温-降温-升温”的过程, 在第一个脉冲周期内器件没有发生热二次击穿的条件, 对比降温弛豫时间 $\tau_{fall}(T)$ 和开关脉冲信号的延迟时间 t_{delay} , 会有三种情形: (1) $\tau_{fall}(T) < t_{delay}$, 每个周期的降温完全结束后, 才会出现下一个周期的升温过程, 称为热安全工作区, 类似于电容每次放电完全结束后, 电流源才给电容充电. (2) $\tau_{fall}(T) > t_{delay}$, 前一个周期的降温过程还没有结束, 下一个周期的升温过程已经开始, 类似于电容的放电还没有完全结束, 又有电流源不断在给它充电, 电容电压一直会增加, 这样循环延续下去, 器件会不断缓慢升温直至发生烧毁. (3) $\tau_{fall}(T) = t_{delay}$, 则处于(1)和(2)的临界点.

应当注意, 器件本身内部的热特性将会加剧热缓慢击穿现象的恶化, 原因如下: 热阻 $R_{th}(T)$ 随温度 T 的增加而增加^[2,8,10], 热容 $C_{th}(T)$ 随 T 增加而略有下降最后达到稳定值^[8], 两者的乘积即热时间常数 $\tau_{th}(T)$ 随 T 增加而增加^[8], 则 $\tau_{fall}(T) \approx 4\tau_{th}(T)$ 也随温度 T 增加而增加, $\tau_{fall}(T)$ 越来越大, $\tau_{fall}(T)$ 大于 t_{delay} 的差值会越来越大(假设 t_{delay} 不变). 这样循环延续下去, 随着开关周期的增加, 热耗散的降温过程越来越慢, 器件的温度会越来越高. 在经过足够多的开关周期后, 晶格温度最终会上升到令器件或半导体芯片发生热烧毁的高温, 造成器件或电路永久性的毁坏. 该现象是与半导体器件本身内部的热特性有关, 难以靠通过改善封装和外散热片根除.

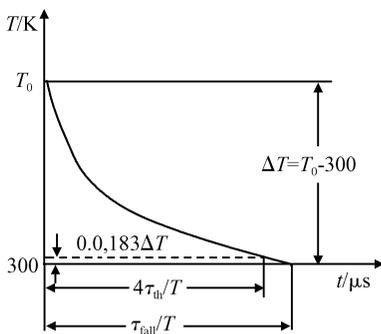


图 3 $\tau_{fall}(T)$ 和 $4\tau_{th}(T)$ 的比较

Fig. 3 Comparison of $\tau_{fall}(T)$ with $4\tau_{th}(T)$

4 热安全工作区和热缓慢击穿现象的证明及其适用性

4.1 降温过程与升温过程的比较

对高频开关而言, 若脉冲频率和占空比没有设计好, 满足了 $\tau_{fall}(T) > t_{delay}$ 的条件, 器件很容易在正常开关工作过程中发生热缓慢击穿, 因此降温过程以及 $\tau_{fall}(T)$ 的研究尤为重要. 本文采用 2D-MEDICI^[11] 电热耦合模拟, 对图 1 所示栅接地 LDMOS 的漏极加上幅值相同的单电流脉冲 ($10^{-3} \text{ A}/\mu\text{m}$), 上升和下降时间都为 10ns, 但电流脉宽 t_p 不

同,以器件区最高晶格温度 T_{\max} 为研究对象,模拟结果如图 4 所示.

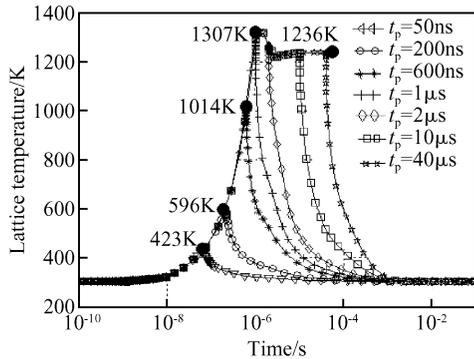


图 4 局部最高晶格温度与时间的关系曲线 漏极电流都是 $10^{-3} \text{ A}/\mu\text{m}$, 上升时间和下降时间都为 10ns.

Fig.4 Transient response of T_{\max} versus time Applied drain current is $10^{-3} \text{ A}/\mu\text{m}$ with rise time 10ns, fall time 10ns.

从图 4 可知,降温和升温过程不对称,升温曲线并非标准的指数曲线^[2,6~8];虽然都是 $10^{-3} \text{ A}/\mu\text{m}$ 的漏极电流,但是因 t_p 不同,峰值温度各不相同(详见图 4),可用公式(2)解释.按照脉宽从小到大的次序,各降温曲线从各自对应的 T_{\max} 开始降温,最终都稳定在 300K,所用时间依次是 3.98, 4.45, 7.82, 9.58, 10.23, 11.42 和 11.37ms;每条降温曲线互不相同,降温曲线并非标准的指数曲线;这都符合公式(3).由该图可知升温驰豫时间 $\tau_{\text{rise}} \approx 1\mu\text{s}$,降温驰豫时间 $\tau_{\text{fall}} \approx 11.40\text{ms}$; τ_{fall} 是 τ_{rise} 的约 1140 倍,表明比较升温过程而言,热耗散的降温过程非常慢,器件从稳态时的最高初始温度 $T_0 = 1236\text{K}$ ($t_p \gg \tau_{\text{rise}}$) 降温到 300K 需要经历 $\tau_{\text{fall}} \approx 11.40\text{ms}$ 的时间,若此时满足 $\tau_{\text{fall}}(T) > t_{\text{delay}}$,器件就会发生热缓慢击穿.

4.2 热安全工作区和热缓慢击穿现象的证明

图 5 是文献[6,7]的实验结果,两组脉冲的周期都是 $40\mu\text{s}$,但占空比 D 不同.当 $D = 0.25$ 时(虚线),脉冲的延迟时间 t_{delay} 较大,第一个周期的降温完全结束,下一个周期的升温才开始,每个周期的峰值温度趋向同一个值,每个周期的升温 and 降温过程可分别用公式(2)和(3)描述,开关器件处在热安全工作区.但是,当 $D = 0.75$ 时(细实线), t_{delay} 较小,第一个周期的降温还未结束,下一个周期的升温已经开始,每个周期的峰值温度渐次增加很明显(粗实线),开关器件发生热缓慢击穿,其特点是:随着器件连续工作时间的加长,器件由逐渐发热直至发生导致器件或电路损坏的热二次击穿.

4.3 热安全工作区和热缓慢击穿现象的适用性

本文的思想可以初步估算令开关器件处于热安

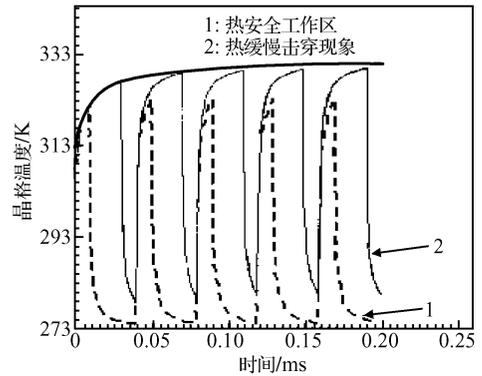


图 5 热安全工作区和热缓慢击穿现象示意图^[6,7]

Fig.5 Results of thermal safe operation area (dashed) and slow thermal runaway phenomena (solid)^[6,7]

全工作区还是发生热缓慢击穿的脉冲频率 f 或占空比 D 的大致范围(暂忽略脉冲的上升时间及下降时间的影响,设 $t_p \gg \tau_{\text{rise}}$).例如设 LDMOS 的 $R_{\text{th}} = 3.5\text{K}/\text{W}$, $C_{\text{th}} = 5\mu\text{s} \cdot \text{W}/\text{K}$, 则 $\tau_{\text{fall}} \approx 4\tau_{\text{th}} = 4R_{\text{th}}C_{\text{th}} = 70\mu\text{s}$, (1) 若 $D = 0.5$, $t_{\text{delay}} > 70\mu\text{s}$, 即 $f < 7.14\text{kHz}$, 器件处在热安全工作区;若 $t_{\text{delay}} \leq 70\mu\text{s}$, 即 $f \geq 7.14\text{kHz}$, 器件发生热缓慢击穿或处于临界点; (2) f 相同, D 的差异也会导致器件工作在不同的区域,如 $f = 10\text{kHz}$, 若 $D < 0.3$, 器件处在热安全工作区;若 $D \geq 0.3$, 器件发生热缓慢击穿或处于临界点.

总之,只要满足 $\tau_{\text{fall}}(T) < t_{\text{delay}}$, 开关器件就处在热安全工作区;若 f 非常高或 D 非常大,满足 $\tau_{\text{fall}}(T) > t_{\text{delay}}$, 就会发生热缓慢击穿,开关器件将会缓慢升温最后将达到以致烧毁器件或芯片的高温.

5 结论

本文研究器件在正常开关工作下的瞬态热特性,给出连续脉冲信号作用时器件内部晶格温度的变化规律公式,分析了热缓慢击穿现象的产生原因并和实验结果对比证明其合理性.初步估算连续脉冲信号的频率或占空比对器件的影响,结果表明:若 $\tau_{\text{fall}}(T) < t_{\text{delay}}$, 开关器件就处在热安全工作区;若 $\tau_{\text{fall}}(T) > t_{\text{delay}}$, 器件就会发生热缓慢击穿.本文的思想可作为进一步研究优化和设计热安全工作的器件、SPIC 及混合功率模块的参考.

参考文献

- [1] Chen Xingbi, Tang Maocheng. Theory and design of the transistors. Chengdu: UESTC Publishing, 1987: 147 (in Chinese)[陈星弼,唐茂成.晶体管原理与设计.成都:成都电讯工程学院出版社,1987:147]
- [2] Kevin F, Krishna S. Electrothermal effects during unclamped

- inductive switching (UIS) of power MOSFET's. IEEE Trans Electron Devices, 1997, 44(5): 874
- [3] Amerasekera A, Duvvury C. ESD in silicon integrated circuits. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2002: 326
- [4] Denison M, Blaho M, Rodin P, et al. Moving current filaments in intergrated DMOS transistors under short-duration current stress. IEEE Trans Electron Devices, 2004, 51(10): 1695
- [5] Li Meizhi, Wei Guangping, Chen Xingbi. Analysis of local electro-thermal effects of LDMOS power devices. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(9): 1823 (in Chinese) [李梅芝, 韦光萍, 陈星弼. LDMOS 的局部电热效应分析. 半导体学报, 2005, 26(9): 1823]
- [6] Min Y J, Palisoc A L, Lee C C. Transient thermal study of semiconductor devices. Sixth IEEE Semi-Therm TM Symposium, 1990: 82
- [7] Min Y J, Palisoc A L, Lee C C. Transient thermal study of semiconductor devices. IEEE Trans Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1990, 13(14): 980
- [8] Angel C, Gillon R, Ionescu A M. Self-heating characterization and extraction method for thermal resistance and capacitance in HV MOSFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2004, 25(3): 141
- [9] Li Hansun. Basic analyse of basic circuit. 3rd ed. Beijing: Higher Education Publishing, 1993: 57 (in Chinese) [李瀚荪. 电路分析基础. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1993: 57]
- [10] Sze S M. Physics of semiconductor devices. 2nd ed. New York: Wiley, 1981: 41
- [11] TMA Medici. Technology Modeling Associates, Inc. Version 2.0, 1994

Transient Thermal Effects of LDMOS in Switching Operation *

Li Meizhi[†], Guo Chao, and Chen Xingbi

(School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The phenomenon of slow thermal runaway is studied and verified with thermal circuits to describe the rise and fall characteristics of lattice temperature during continuous pulses of applied electric power which produces thermal effects. Our results show that a high-frequency switch can operate in the thermally safe operation area if the delay time of the applied pulses is longer than the thermal delay time during the fall process of lattice temperature. We show that LDMOS will switch in the thermally safe operation area with its thermal resistance of 3.5K/W and thermal capacitance of 5 μ s · W/K if the frequency of the applied pulses is less than 7.14kHz with a duty cycle of 0.5, or if the duty cycle of the applied pulses is less than 0.3 with a frequency of 10kHz. A criterion is given for power devices in the thermally safe operation area.

Key words: thermal circuits; formulas; fall; slow thermal runaway;

EEACC: 2560R

Article ID: 0253-4177(2006)11-1989-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60476036)

[†] Corresponding author. Email: hanli@uestc.edu.cn

Received 7 April 2006, revised manuscript received 24 May 2006