

LDMOS 开关在不同频率下的热安全工作*

李梅芝[†] 陈星弼

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 研究了 LDMOS 器件内部的最高温度与开关频率之间的关系. 结果表明: 在较高频率工作时, 器件内部的最高温度与器件的热容、功耗、占空比和连续工作时间有关, 而与器件的热阻和信号周期无关, 器件会一直处于升温状态; 在较低频率工作时, 器件内部的最高温度还与器件的热阻和周期有关. 所得结果可作为功率器件在各种频率下工作时热安全工作的参考.

关键词: 热安全工作; 最高温度; 开关频率
EEACC: 2560R

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)06-0938-05

1 前言

近几十年来, 随着集成电路的快速发展, 高效的电源需求增大, 因此开关电源成为目前常用的电源. 开关电源向着高频化发展, 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, 分析器件或 IC 内部热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, 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^[1~8].

开关的工作频率范围变化很大, 从较低频率(kHz 数量级)到较高频率(MHz 数量级). 在不同的频率范围内主要有哪一些参数决定器件的温度, 进而优化这些参数使器件安全工作, 这是对器件乃至整个芯片或电路模块都非常重要的问题, 而迄今还缺乏详细的分析和对比. 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, 先分析和证明文献[9]中提出的器件内部晶格温度的变化规律公式的合理性, 并给出较低频率时的简化“热安全工作公式”; 然后进一步推导出较高频率时的简化“热安全工作公式”, 并进行了分析.

2 热安全工作的理论分析

2.1 晶格温度的变化规律

文献[9]中将正常开关工作下的 LDMOS 器件内部等效为热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 联成的热路, 则热时

间常数为 $\tau_{th} = R_{th} C_{th}$. 由于 R_{th} 在 423 和 298K 时相差只有 35%^[2], 故在下面分析中取一个恒定的值; 同时假设输入功率是阶梯形并且器件处于热传导状态. 由熟知的热传导基本方程 $\frac{\partial T}{\partial t} - D \cdot \nabla^2 T = \frac{q(t)}{\rho C_p}$ 得到单脉冲信号作用时的升温、降温及连续脉冲下的温度随时间的变化, 类似 RC 电路的零状态响应和零输入响应以及完全反应, 可分别用下面三个公式表述:

$$T(t) - 300 = R_{th} P(t)(1 - e^{-t/\tau_{th}}), t \geq 0 \quad (1)$$

$$T(t) - 300 = (T_0 - 300)e^{-t/\tau_{th}}, t \geq 0 \quad (2)$$

$$T(t) - 300 = R_{th} P(t)(1 - e^{-t/\tau_{th}}) + (T_0 - 300)e^{-t/\tau_{th}}, t \geq 0 \quad (3)$$

(1) 式表示单脉冲作用时的升温过程, 器件的起始温度为 300K, 功耗为 $P(t)$, t 时刻器件内部的最高温度上升到 $T(t)$; (2) 式表示单脉冲作用时的降温过程^[9,10], T_0 为开始降温的初始温度, t 时刻降温到 $T(t)$ ($T(t) < T_0$). 根据(1)和(2)式, 脉宽越大, 占空比越大, 温度上升越大, 降温达到 300K 所用的时间也越长. (1), (2)式与文献[10]的结果比较如图 1 所示, 当采用 $R_{th} = 7.7\text{K/W}$, $\tau_{th} = 33\text{ms}$ 时, (1), (2)式与文献[10]的测试结果的最大误差约 19%, 在最高温度处, 证明(1)~(3)式是比较精确的.

(3) 式描述连续脉冲 (即重复开关模式) 作用时的温度变化规律^[6,7,10]. 它可以分解为瞬态响应和稳态响应. 和电路中原理解相似^[11], 暂态响应起着调节作用, 它与初始状态和稳态值的初始值之差有关. 当这差值不为零时, 存在暂态响应, 它起着调整这一

* 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

2006-12-30 收到, 2007-02-09 定稿

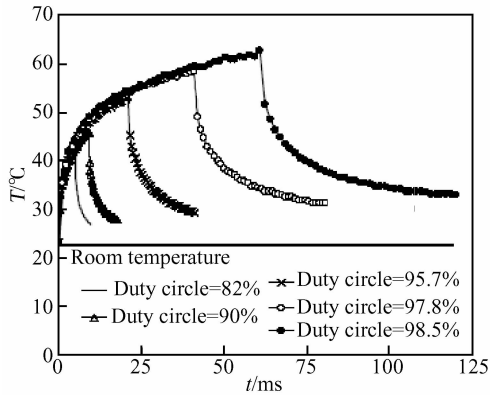


图 1 文献[10]的测试结果
Fig. 1 Experimental results in Ref. [10]

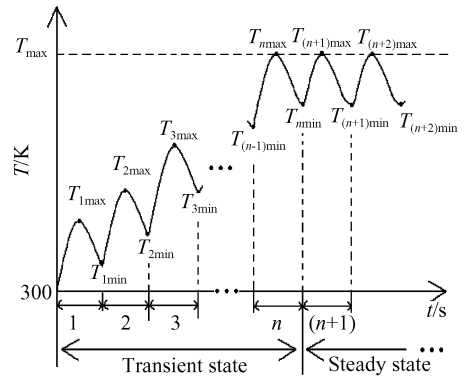


图 3 温度随时间变化的简单示意图
Fig. 3 Temperature versus time

差距的作用. 这一调节过程是与热路本身固有特性有关的, 因而取决于热路的时间常数 τ_{th} . 实际上, 一般可以认为暂态响应在 $t = 4\tau_{th}$ 时消失, 此后热路完全由稳态响应所决定, 热路直接进入了直流稳态. 这就是说, 通常要经过一段过渡时期才能进入稳态, 如图 2 所示. 该图是文献[6, 7]的测试结果, 图中实线所示的 5 个周期处在 $t < 4\tau_{th}$ 内的暂态响应阶段; 而图中虚线则表明器件直接进入稳态响应, 没有经历瞬态响应的过渡时期.

2.2 频率较低时热安全工作及分析

由于电功率(电压或电流)的上升和下降时间通常小于 $0.1\mu s$, 而热弛豫时间常数一般为 ms 数量级, 所以本文忽略电功率的上升下降时间对升温 and 降温的影响.

若设器件工作在连续的理想方波下, 该方波周期为 T , 占空比为 D , 在导通时间 DT 内的任何时

刻器件的功耗均为 $P(t) = v(t)i(t)$, 其中 v, i 为瞬态下面器件的外加电压和流过的电流. 本文假定在一个脉冲电压 v 的幅值为 V 且 V 为常数的条件下的工作情形, 其中 i 实质上是随时间变化的, 其幅值为 I , 在模拟中也是如此. 由于许多讨论热效应的文献都采用 $P = VI$ 这种表示方式, 本文也就用 $P = VI$ 代表瞬态功耗. 在关断时间 $(1 - D)T$ 内功耗为零, 则器件在每个周期的升温时间和降温时间亦分别为 DT 和 $(1 - D)T$, 器件初始温度为 $300K$, 允许的最高工作温度为 T_{max} ($T_{max} > 300K$).

当器件工作在单脉冲时, 则根据(1)式可以得出器件安全工作需要满足下列关系:

$$R_{th} VI(1 - e^{-DT/R_{th}C_{th}}) \leq T_{max} - 300 \quad (4)$$

若工作频率非常低或占空比非常大, 则器件的最高温度会在每一个周期内上升到一个稳态值^[9].

当器件工作在多脉冲时, 分为下面两种情况:

(1) 若 $4\tau_{th} \leq (1 - D)T$, 因 $e^{-(1-D)T/\tau_{th}} \leq e^{-4} \leq 1.83\%$, 每个周期升温后会完全降温到 $300K$, 下一个周期重新从 $300K$ 升温, 器件达到的最高温度为:

$$R_{th} VI(1 - e^{-DT/R_{th}C_{th}}) \leq T_{max} - 300$$

故此时可由公式(4)确定.

(2) 若 $4\tau_{th} > (1 - D)T$, 器件会经历一定的瞬态响应过渡到稳态响应. 如图 3 所示, 设第 n 个周期内, 峰值温度和谷值温度分别为 T_{nmax} 和 T_{nmin} ($n = 1, 2, 3, \dots$), 器件的热阻和热时间常数分别为 R_{th} 和 τ_{th} 的常数. 这里将器件热安全工作区的临界条件设为: 在第 $n - 1$ 个周期器件刚从瞬态响应阶段进入稳态响应状态, 随后每个周期的峰值温度都达到相等且不超过最高温度 T_{max} , 即满足:

$$T_{nmax} = T_{(n-1)max} = T_{(n+1)max} = T_{(n+2)max} = \dots = T_{(n+m)max} \leq T_{max}, m \geq 0, \text{且为自然数.}$$

故根据(3)式和图 3 可以得出器件安全工作需要满足下列关系:

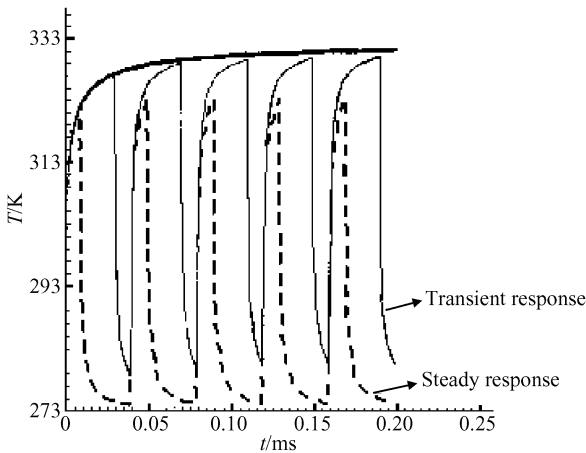


图 2 文献[6, 7]的测试结果(其中最上一条线是峰值温度的包络线)

Fig. 2 Experimental results in Refs. [6, 7]

$$R_{th}P(1 - e^{-DT/\tau_{th}})/(1 - e^{-(1-D)T/\tau_{th}}) \leq T_{max} - 300 \quad (5)$$

这里称公式(5)为简化的低频热安全工作公式. 由(5)式可知, R_{th} 越小, P 越小, T 越小, D 越小, τ_{th} 越小, 越有利于器件工作在较低的温度内.

由(5)式还可推出对器件所加的电压及电流的限制条件. 例如, 已知 LDMOS1 的参数是: 298K 时 $R_{th} = 10\text{K/W}$, 热容 $C_{th} = 5\mu\text{s} \cdot \text{W/K}$, 则 $4\tau_{th} = 200\mu\text{s}$, 器件的工作温度范围为 298~423K. 工作脉冲的 $T = 200\mu\text{s}$, $D = 0.5$, 导通电压 $V = 5\text{V}$, 此时 $4\tau_{th} > (1 - D)T$, 则根据(5)式解得: $I \leq 2.5\text{A}$.

2.3 频率较高时热安全工作及分析

在高频工作时, 设在 t 时刻的周期 Δt 内, 占空比为 $D(t)$, 总功耗(包括导通时的功耗及开与关过程中的功耗)为 $P(t)$, 器件自身的热阻和热容分别为 $R_{th}(t)$ 和 $C_{th}(t)$, 则热时间常数为 $\tau_{th}(t) = R_{th}(t)C_{th}(t)$. 根据(1)及(2)式, 器件在 $D(t)\Delta t$ 时段内温度上升量 $\Delta T_{rise} = R_{th}(t)P(t)(1 - e^{-D(t)\Delta t/\tau_{th}(t)})$; 每个周期末尾的净温度上升量 $\Delta T_{av} = \Delta T_{rise} e^{-(1-D(t))\Delta t/\tau_{th}(t)}$.

一般 $\tau_{th}(t)$ 为毫秒数量级, 而高频信号的周期 Δt 为纳秒数量级, $\Delta t/\tau_{th}(t)$ 非常小, 所以 ΔT_{rise} 和 ΔT_{av} 可以分别近似为: $\Delta T_{rise} = R_{th}(t)P(t)D(t) \times \Delta t/\tau_{th}(t) = P(t)D(t)\Delta t/C_{th}(t)$; $\Delta T_{av} = \Delta T_{rise} \times e^{-(1-D(t))\Delta t/\tau_{th}(t)} = P(t)D(t)/C_{th}(t)(1 - (1 - D(t))\Delta t/\tau_{th}(t))$.

经过多个周期后, 所有周期的净温度上升量之和为:

$$T_{av} = \int \Delta T_{av} = \int_0^t P(t)D(t)/C_{th}(t)(1 - (1 - D(t))\Delta t/\tau_{th}(t))dt \quad (6)$$

(6)式中含有 $(1 - D(t))\Delta t/\tau_{th}(t)$ 的项, 因高频信号的周期 Δt 比 $\tau_{th}(t)$ 小很多数量级, 故该项在每个周期的值很小, 表明每个周期的峰值温度与谷值温度很接近.

由(6)式可知, 在 t 时刻的温度上升量 T_{av} , 与 $P(t)D(t)/C_{th}(t)$ 对时间的积分有关, $C_{th}(t)$ 越大, $P(t)$ 越小, $D(t)$ 越小, 连续工作时间越短, 器件的温度越低; 而 T_{av} 与器件自身的热阻 $R_{th}(t)$ 和周期 T (或频率 f) 没有关系. 这个结果与低频工作时不同. 表明在高频工作时, 器件一直处于升温状态, 连续工作时间越长, 器件的温度上升越大, 经过足够长的时间后, 器件会发生热击穿.

由(6)式可以计算高频工作时器件的温度以及每个周期的峰值和谷值温度. 例如, 开关 LDMOS2 的参数为: $R_{th} = 20\text{K/W}$, $C_{th}(t) = 20\mu\text{s} \cdot \text{W/K}$, $P(t) = 1\text{mW}$, $D(t) = 0.1$, 周期 $\Delta t = 100\text{ns}$, 根据

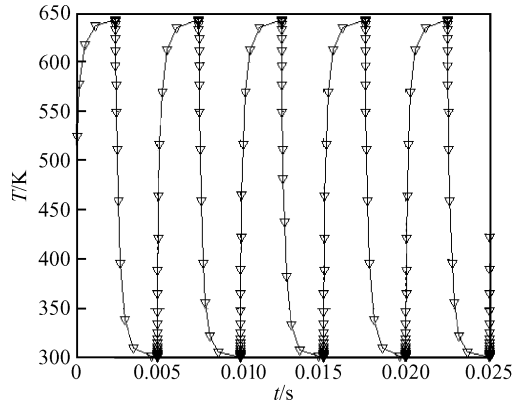


图 4 频率为 200Hz 时温度与时间的关系

Fig. 4 Temperature versus time with the frequency of 200Hz

(6)式计算出一个周期内: $\Delta T_{rise} = 5 \times 10^{-7}\text{K}$, $\Delta T_{av} = 4.99875 \times 10^{-7}\text{K}$. 若器件从 300K 开始工作而升温, 则经过 20 和 40s, 最后周期该器件的峰值温度分别达到 400 和 500K; 经过 140s, 最后周期的峰值温度将达到 1000K, 而谷值温度比峰值温度小 0.01575K . 若 $D(t) = 0.5$ (其他参数同上), 则经过 4 和 8s, 器件内最高温度分别达到 400 和 500K; 经过 28s, 峰值温度达到 1000K, 而谷值温度比峰值温度小 $7.8 \times 10^{-3}\text{K}$.

若 LDMOS2 (功耗都是 1mW, 占空比都是 0.5) 在不同的频率下连续工作 1s, 则在最后一个周期里, 当工作频率为 200Hz 时, 谷值温度相对器件初始值的上升量为 $7.7 \times 10^{-3}\text{K}$, 峰值温度相对器件初始值的上升量为 0.02K; 当频率为 1kHz 时, 分别为 4.097 和 4.107K; 当频率为 5kHz 时, 分别为 17.1336 和 17.1346K; 当频率为 500kHz 时, 两个值都是 24.906K; 当频率为 10MHz 时, 两个值都是 25K. 可见频率越高, 同一周期的峰值和谷值温度越接近. 由上可知, 当工作频率低于 200Hz 时, 选择低频的计算方法较好; 当工作频率高于 5kHz 时, 选择高频的计算方法较好; 当工作频率介于上述两个频率之间时, 为保险起见, 采用高频的思想方法比较稳妥, 不过此时 $\Delta t/\tau_{th}(t)$ 不是接近 0, 所以指数项 $e^{-D(t)\Delta t/\tau_{th}(t)}$ 和 $e^{-(1-D(t))\Delta t/\tau_{th}(t)}$ 不能取近似值.

为证明上述理论分析的正确性, 对同一个 40V-LDMOS^[5] 器件用 MEDICI^[12] 作了仿真. 设器件栅宽为 $100\mu\text{m}$; 漏极电压为 15V, 负载电阻是 20 Ω ; 栅极加上电压幅值为 6V 的方波信号, 上升时间和下降时间均为 1ns, 占空比均为 50%, 器件温度与频率的关系如图 4 和 5 所示, 图 5(b) 是图 5(a) 的局部放大图 (只有栅信号频率不同, 其他条件都相同). 由图 4 和 5 可知, 当器件工作在 200Hz 的较低频率时, 每

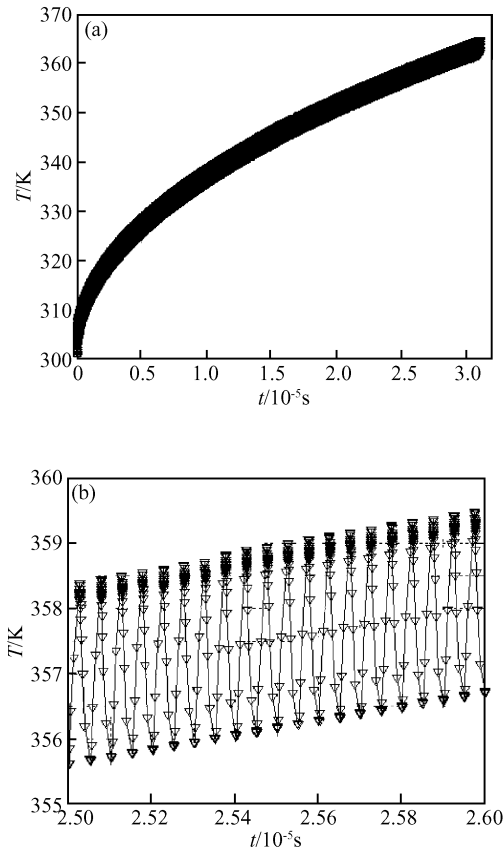


图5 (a)频率为20MHz时温度与时间的关系;(b) (a)的局部放大图

Fig. 5 (a) Temperature versus time with the frequency of 20MHz; (b) Local temperature versus time of Fig. 5(a)

个周期内器件的温度变化相同,都是升温到 643K,然后降温到 300K,符合频率较低时热安全公式(4);当器件工作在 20MHz 的较高频率时,器件会一直处于升温状态,并且,后一个周期的峰值温度(或末尾的谷值温度)会高于前一个周期峰值温度(或末尾的谷值温度),如图 5(b)所示,符合频率较高时热安全公式(6)。

总之,不管任何工作频率下,占空比和功耗都是影响器件温度不可忽略的因素。当周期 T 和器件的热时间常数 τ_{th} 数量级相当时,热阻和周期是决定器件温度不可忽略的因素,此时每个周期的谷值温度和峰值温度相差较大;但是,当 T 远小于 τ_{th} 时,热容和连续工作时间是影响器件的主要因素,而热阻和周期的影响作用将消失,此时每个周期的谷值温度和峰值温度相差很小。

此外,本文的思想也可以用于其他各种形状的脉冲。

3 讨论与结论

本文采用 300K 温度时的 R_{th} 值作为平均值,来代替升温及降温过程中 R_{th} 的真实值。其实,这是导致 2.1 节中所述的最大误差为 19% 的原因。这个最大误差是在最高温度处,由理论值比实测值高引起的。应该指出,当温度增高后, R_{th} 变大,从而 τ_{th} 增大,因此在升温阶段,随着温度的升高,其变化比理论预测的慢,且升温的最终值没有理论预测的高。降温时的实际初值也因此比理论预测的低,且开始降温的阶段温度下降的速度也比理论预测的慢。

但是,为了得到简明的结果,采用 300K 的 R_{th} 仍是一个较好的方法,而且,这样的结果在实际应用中较为保险。

本文还采用了 300K 的温度作为硅片底部与封装连接处的温度。该处如是别的温度 T_0 ,则可以用该 T_0 代替 300K。实际上,功率管的封装常有热沉(heat sink)。热沉的时间常数(或叫弛豫时间)远超过本文所用的 τ_{th} ,因此把 T_0 在相当长的时间内当作一个常数是合理的。

总之,本文分析了 LDMOS 器件内部的最高温度与开关频率之间的关系。结果表明:在较低频率时,器件内部最高温度是热阻、热容、功耗、占空比、周期的函数;而在较高频率时,是热容、功耗、占空比和连续工作时间的函数,器件会一直处于升温状态,而与热阻和周期无关。本文所得结果可以作为功率器件在不同频率下热安全工作的参考。

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. 6th 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 Compon, Hybrids, Manufact Technol*, 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 Meizhi, Guo Chao, Chen Xingbi. Transient thermal effects of LDMOS in switching operation. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(11):1989 (in Chinese)[李梅芝, 郭超, 陈星弼. LDMOS 在正常开关工作下的瞬态热效应. *半导体学报*, 2006, 27(11):1989]
- [10] Tazzoli A, Meneghesso G, Zanoni E. A novel fast and versatile temperature measurement system for LDMOS transistors. *Microelectronics Reliability*, 2005, 45(9~11):1742
- [11] Li Hansun. Basic analyse of basic circuit. 3 rd ed. Beijing: Higher Education Publishing, 1993:79(in Chinese)[李瀚荪. 电路分析基础. 第三版. 高等教育出版社, 1993:79]
- [12] TMA Medici, Technology Modeling Associates, Inc Version 2, 1994:2

Thermal Safety of Switching Operation of LDMOS Under Different Frequencies*

Li Meizhi[†] and Chen Xingbi

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The relation between the maximum temperature and the switching condition of an LDMOST under different frequencies is studied. The results show that the maximum temperature in the device depends on the thermal capacitance, the power dissipation, the duty cycle, and the duration of continuous operation under a high switching frequency. Under a low switching frequency, the maximum temperature depends not only on those four parameters, but also on the thermal resistance and the period of the cycle. The results given here can be used as a reference for designing the thermal safe operation conditions of power devices.

Key words: thermal safety; the maximum temperature; switching frequencies

EEACC: 2560R

Article ID: 0253-4177(2007)06-0938-05

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

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

Received 30 December 2006, revised manuscript received 9 February 2007