

MCT 最大可关断电流的解析分析

周宝霞 陈治明

(西安理工大学电子工程系 西安 710048)

摘要 通过对 MCT 关断存贮期电流分布及变化的动态分析, 利用电荷控制原理推导出 MCT 最大可关断电流的解析表达式, 并且同利用通用器件模拟软件对同一器件进行的数值分析结果进行对比, 验证了所得解析表达式的可靠性

EEACC: 2560J, 0290, 2570B

1 引言

MCT 是一种融合了单、双极器件优点的新型功率半导体器件, 既有晶闸管等双极器件的高电压、大电流特性; 又有功率 MOS 等单极器件开关损耗低、速度快的优势。单极器件由于是多数载流子导电, 导通时不存在少子存贮效应, 因而开关速度快; 双极器件由于导通时存在基区电导调制效应, 虽具有良好的导通特性, 但开关速度因此而下降。因此人们对 MCT 器件关断能力和开关速度的研究特别关注。Temple 曾对 MCT 的关断能力进行了分析^[1], 得到 MCT 最大可关断电流与器件结构和掺杂分布的关系。其出发点是: 当 MCT 短基区的电位降低到两边的发射极都不再发射载流子时, 器件就会实现关断。本文从关断过程中电流的动态变化出发, 对 MCT 的关断存贮期进行分析, 以电荷控制模型来确定 MCT 的最大可关断电流的分析关系式。

2 理论分析

MCT 通过开通其中的集成关断 MOSFET (OFF-FET) 来抽取 p 基区 (以 p-MCT 为例) 中的存储电荷, 从而减小 n^+ 发射极的发射效率, 破坏其内含晶体管之间的电流正反馈, 使之脱离晶闸管锁定状态而实现关断。与 GTO 的关断过程^[2,3]类似, 栅极对 p 基区存储电荷的抽取过程决定其关断存贮期的长短。MCT 的存贮期不能过长, 否则关断就会失败。可见关断过程中的存贮期对 MCT 的关断能力十分关键。因此, 本文从对 MCT 关断存贮期的分析入手推导其最大可关断电流的表达式。

在 MCT 的存贮期, 具体晶闸管的 p 基区按阴极电流的分布情况分为两部分, 如图 1 所

周宝霞 女, 1966 年出生, 工学博士, 主要从事电力半导体器件的研究
陈治明 男, 教授, 博士生导师, 现从事半导体材料和电力半导体器件的研究
1997-04-09 收到, 1997-07-18 定稿

示 其中, 区 I 电流分布均匀, 区 II 电流分布不均匀 相应的电位及载流子密度分布情况如图 2 所示 OFF-FET 首先对沟道附近区域的存储电荷进行抽取, 然后向发射区中部延伸, 因而存储期内区 II 不断扩展, 区 I 逐渐收缩 当区 II 扩展到接近阴极发射极中部时, 存储电荷的抽取过程接近结束

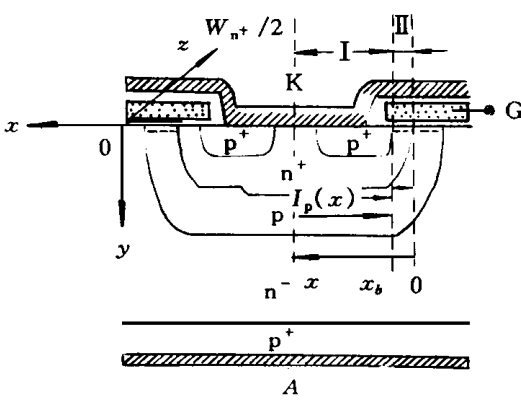


图 1 MCT 结构示意图

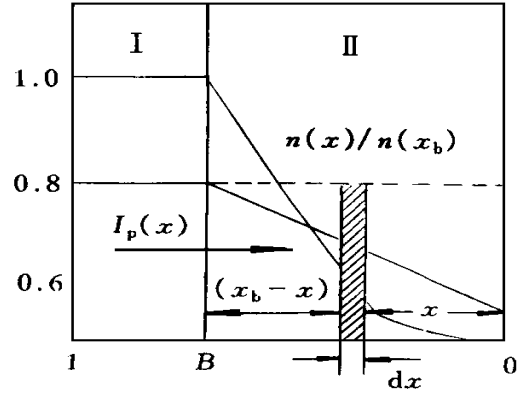


图 2 MCT 存储期的电位及载流子密度分布图

借用 Baliga 等人对基区电阻晶闸管(BRT)器件关断过程的分析^[4], MCT 的存储时间可表示为

$$t_s = \frac{qW_p n_p}{J_h} \ln \left[\frac{V_{be}}{V_{be} - (0.125 \rho_{sq} W_{n^+}^2 + 0.5 W_{n^+} L R_m) J_{tr}} \right] \quad (1)$$

式中 W_p 和 W_n 分别表示 p 基区和 n^+ 发射区的宽度; J_h 表示空穴电流密度; L 表示沿发射极长度方向 (z 方向) 的器件单元尺寸; ρ_{sq} 表示 p 基区的薄层电阻; R_m 表示 OFF-FET 的沟道电阻; V_{be} 表示 $x = x_b$ 处的势垒高度, n_p 表示 p 基区的平均载流子密度; q 为电子的电荷量 按照 Dutta 的分析^[5], 其值可表示为

$$n_p = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{J_h}{q \sqrt{GD_n}}} \quad (2)$$

式中 D_n 为电子扩散系数; G 为俄歇复合系数中的一个常数 将式(2)代入式(1)得

$$t_s = \frac{W_p}{2} \sqrt{\frac{q}{J_h \sqrt{GD_n}}} \ln \left[\frac{V_{be}}{V_{be} - (0.125 \rho_{sq} W_{n^+}^2 + 0.5 W_{n^+} L R_m) J_{tr}} \right] \quad (3)$$

将器件的结构参数代入式(3), 即可得到存储时间 t_s 与空穴电流密度之间的明确关系, 如图 3 所示 这里, 根据器件的结构和掺杂分布有 $R_m = 422 \Omega$, $\rho_{sq} = 657 \Omega/\text{cm}^2$; $L = 100 \mu\text{m}$; $W_{n^+} = 14 \mu\text{m}$. 图中可见, MCT 的存储时间随着空穴电流密度的增高而延长, 并在接近一有限电流密度时趋于无限长 这意味着 MCT 不能关断 因此, MCT 存在一个最大可关断电流

从式(3)可以看出, 当其对数项中的分母趋近于零时, 存储时间将无限延长, 因而极限空穴电流密度

$$J_{hm} = \frac{8V_{be}}{\rho_{sq} W_{n^+}^2 + 4R_m W_{n^+} L} \quad (4)$$

利用上式以及阳极电流在存储期内基本不变的条件即可求得MCT的最大可关断电流 I_{TGQM} 。利用图4所示的MCT等效电路不难看出,其最大可关断阳极电流可表示为

$$I_{TGQM} = \frac{I_{CM}}{\alpha_{np}^n} \quad (5)$$

式中 α_{np}^n 是晶体管 T_1 的最大电流放大系数; I_{CM} 是晶体管 T_1 的集电极电流,在存储期的末期被关断沟道抽取,因而可用 J_{hm} 表示为

$$I_{CM} = J_{hm} \frac{W_{n^+}}{2} L \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),即得

$$I_{TGQM} = \frac{J_{hm} W_{n^+} L}{\alpha_{np}^n} \quad (7)$$

将式(4)代入式(7),即得到反映MCT最大可关断电流与器件尺寸、p基区薄层电阻、晶体管的共射极电流放大系数以及OFF-FET沟道电阻等器件结构与物理参数关系的解析表达式。利用这个关系式可对MCT的关断特性进行快速而直观的分析 and 讨论,从而为器件的结构设计和优化提供了一个比较简捷但并不失为精确的手段。

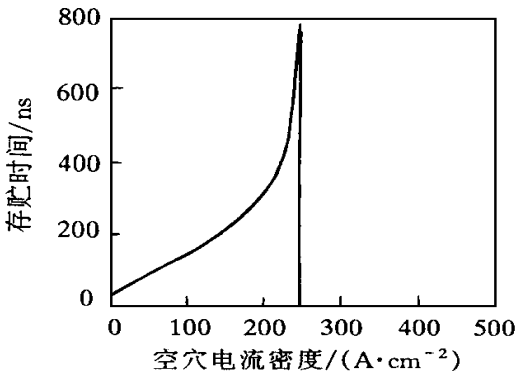


图3 存储时间与空穴电流密度的关系

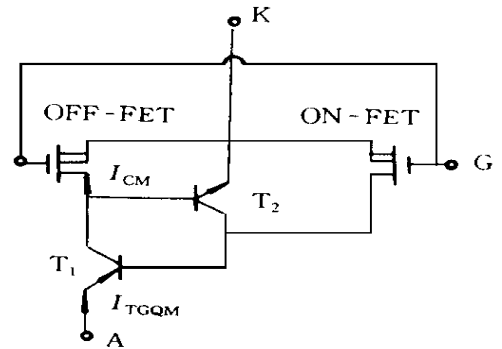


图4 MCT等效电路图

3 结果的应用与分析

图5(a)表示利用以上结果描绘的MCT最大可关断电流密度与阴极发射极宽度 W_{n^+} 的关系。从中可以看出,最大可关断电流密度随着阴极发射极的加宽而下降。这是因为,随着阴极发射极宽度的增加,关断沟道对p基区靠近发射极中心的存储电荷的抽取变得更加困难。因此,减小发射极宽度可提高MCT的关断能力。由此证明了MCT单胞集成度的提高对其关断能力的改善是有益的。

图5(b)显示了MCT最大可关断电流密度与OFF-FET栅压的关系。图中可见,最大可关断电流密度随栅压绝对值的增加而提高。这主要是由于栅压的提高使OFF-FET沟道电阻减小,从而使最大可关断电流密度增加。图中,在 $V_{GS} = -11V$ 时,最大可关断电流密度仅有 $238A/cm^2$,但当栅压增加到 $-20V$ 时,最大可关断电流密度可高达 $1447A/cm^2$ 。因而在确保栅-源间不会发生击穿的情况下,尽量使用高栅压可提高MCT的最大可关断电流密度。

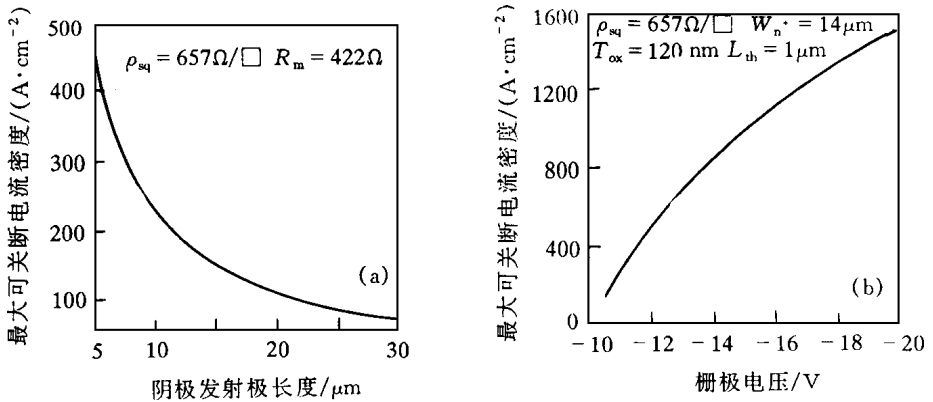


图 5 MCT 最大可关断电流与 W_{n^+} (a) 和关断栅压 (b) 的关系

应用 PISCES-IB 器件模拟软件在器件结构和材料参数都不变的情况下再进行一次数值模拟, 其结果与用以上解析式获得的结果并列于表 1. 从中可见, 两个结果非常接近

表 1 MCT 关断特性的数值模拟结果与解析结果的对比 ($V_{GS} = -11V$)

	$J_{TQM} / (A \cdot \mu m^{-1})$	t_s / ns
数值法	1.26×10^{-6}	200
分析法	1.88×10^{-6}	213

4 结论

采用电荷控制原理, 通过对 MCT 关断存贮期电流变化的动态分析, 得到 MCT 最大可关断电流的解析表达式, 并且将分析结果与用国际通用器件模拟软件 PISCES-IB 进行数值模拟所得到的结果进行对比, 证明该关系式的可靠性. 利用分析结果对影响 MCT 关断特性和关断能力的器件结构因素和应用条件进行了简单讨论, 表明该关系式可为器件的结构设计和优化提供了一个比较简捷又有一定精确度的手段

参 考 文 献

- [1] V. A. K Temple, IEEE Trans Electron Devices, 1986, **ED-33**(10): 1609
- [2] Jan Vobecky *et al*, IEEE Trans Electron Devices, 1993, **ED-40**(12): 2352
- [3] E. D. Wolley, IEEE Trans Electron Devices, 1966, **ED-13**(10): 590
- [4] M. Nandakumar and B. J. Baliga, Solid-State Electronics, 1995, **38**(3): 703
- [5] Ranadeep Dutta, Cheanlung T say, Allen Rothwarf and Robert Fischl, IEEE Trans Electron Devices, 1994, **ED-9**(6): 560

Analysis of MCT for Its Maximum Turn-Off Current

Zhou Baoxia, Chen Zhiming

(Department of Electronic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Received 9 April 1997, revised manuscript received 18 July 1997

Abstract Based on analysis of the instantaneous current distribution in p-base region during the storage period of MCT, an analytical formula is derived in the view point of the charge controlled principle to express its maximum turn-off current. The formula relates the maximum turn-off current of MCT to the emitter width, length, p-base sheet resistance and OFF-FET channel resistance. The analysis is verified by a comparison with the results of numerical simulation for the same device.

EEACC: 2560J, 0290, 2570B