

实用电子技术丛书

场效应管基础与应用实务

吴红奎 编



科学出版社

实用电子技术丛书

场效应管基础与应用实务

吴红奎 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“实用电子技术丛书”之一,从实践和一般应用的角度全面介绍了场效应管(FET)。重点介绍了市场上的主流品种——VMOS的应用知识。考虑到本书是针对功率电子领域的入门者与实践者,因此尽量避免介绍很深的理论知识而侧重于应用,同时侧重了知识面的“广度”方面的介绍,试图达到“抛砖引玉”的目的。

本书内容包括认识 FET、实践入门、VMOS 的技术参数详解、JFET(结型 FET)的技术参数概述,基本电路、范例电路等几部分。作者根据自己的从业经验,从实践出发,试图从应用的角度告诉读者,撇开芯片级的 FET 制造、设计理论,FET 用起来并不难。

本书对于电子爱好者、即将就业的电子专业大学生有启发性作用,对刚刚从事电器、电工、电子电路硬件设计的工程师亦有参考价值,也适合工科院校的非电专业作为基础专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

场效应管基础与应用实务/吴红奎编. —北京:科学出版社,2011
(实用电子技术丛书)

ISBN 978-7-03-030538-1

I. 场… II. 吴… III. 场效应晶体管 IV. TN386

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 040384 号

责任编辑:杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 4 月第一次印刷 印张: 17 3/4

印数: 1—5 000 字数: 358 000

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

希望不要貽笑大方

(代前言)

曾经分不清电子爱好者和无线电爱好者的区别,很长时间里自诩为无线电爱好者,后来逐渐明白,无线电爱好者的门槛其实更高,要花的钱也更多,即使将收音机爱好者也算作无线电爱好者,收音机电路其实也比多数电子电路复杂,甘做电子爱好者,心中也就释然了。

除去无线电,电子的领域仍然很宽泛,即使科班出身的人,也难以涵盖全部,不过这样的爱好者一般都有相当的理论基础,即使爱好离所学专业很远,恐怕也不算业余爱好者了。与“正宗”的业余爱好者相比,这样的爱好者显然要幸福得多了。

“正宗”的业余爱好者很难有从事专业研究的机会,爱好以体验实践为主也就不足为奇了:对理论与原理不求甚解,系统创新的东西,基本上就不要想了。请不要误解,这不是为轻视基础理论研究找借口,尽管这也是很多生产商忽略的地方:一旦过了专门学习的人生阶段,系统学习、实践一门知识实在不是件容易的事情。

虽然有幸接受过高等教育,专业却也是与电子不相干。有幸的是,初中的时候,上到了一所实验室和实验条件都相当好的学校,当初中物理电学部分学完的时候,我就已经能独立为家里的家用电器布线了:选线、走线、保险丝、插座、灯头……此后,从高中到大学,我有幸遇到过实验室条件好得多的学校,但是再也没有机会遇到实验条件这样好的学校了,也愈发意识到我们的实践机会太少了,尤其是对电子而言。

笔者的工作与电无关,工作之余,有幸参与了一家民营企业对板级封装模块的研发与试生产,在与客户的工程师们打交道的过程中,我不止一次被问及诸如“125W 的管子(VMOS 或 IGBT)能输出多大的功率?”之类的问题,这个乍一听有理(应该给予回答)的问题,实际上却是个伪问题:“管子”就像是盖大楼的砖与水泥,路边的窝棚和百米高楼,基本的材料都是砖与水泥,它们能盖多高的楼?

如果这本书能够给予你大胆使用“新型”器件的勇气并且不被诸如“铁素体比铁氧体如何如何优秀”之类的问题迷住眼的话,这本书的目的就达到了。本书试图探讨解决“什么是的问题”。

“预防医学”硕士吴红静女士、“食品科学”博士涂追先生帮助笔者完成了书中所有非中文专业术语的翻译与勘校工作,资深电子爱好者郑玉山、工程师(机械专业)王文丽、销售经理(非电专业)王素苹参与了本书插图的绘制和资料选编,从事电动三轮车充电器生产的技师朱由恭师傅也给本书的编写提供了相当宝贵的建议,与本书相关的爱好者、业者在工作实践中所积累的、虽然不够系统、但是数量却足以用“海量”来形容的应用资料,则是本书的基石,在此一并向他(她)们致以最诚挚的谢意。

本书在某些方面可能不够严谨,“创新”的东西可能也不如你所想的那么多,不过,如果你能够将重新组合也视为“创新”的话,你还是能够发现很多作者自己的观点。当然,疏漏不足之处自然也是难免的,还望“无意间”读到本书的人能给予宽容,如果有可能,更希望能够不吝斧正。

吴红奎

2010年12月于安阳

目 录

第 1 章 认识场效应管	1
1.1 身边的场效应管	1
1.1.1 从麦克风说起	1
1.1.2 打开一块手机的锂电池	3
1.1.3 运算放大器	5
1.2 场效应管是如何工作的	5
1.2.1 N 型、P 型半导体与 N ⁺ 型、P ⁺ 型半导体	6
1.2.2 FET 是如何工作的:N 沟道、P 沟道	8
1.2.3 场效应管的简单分类 :JFET 与 MOSFET	8
1.2.4 JFET 是如何工作的	10
1.2.5 MOSFET 是如何工作的	11
1.3 场效应管的种类	12
1.3.1 TMOS、VMOS	12
1.3.2 DMOS、 π MOS	14
1.3.3 VDMOS(VMOS)、UMOS(UDMOS、UVD MOS)	14
1.3.4 LDMOS	15
1.3.5 HEXMOS 与管芯结构	16
1.3.6 耗尽型 MOSFET	18
1.3.7 VFET、V-FET 与 SIT	18
1.3.8 MESFET	19
1.3.9 HFET、HEMT、HHMT	20
1.3.10 DGMOSFET、FinFET、PSDG MOSFET	21
1.3.11 TFT	22
1.3.12 制造商的专利名称	22
1.3.13 MOS 的集成:CMOS、BiCMOS/BiMOS、HV-CMOS	23

1.3.14 FET 发展简史	25
1.4 场效应管的个性	27
1.5 电路中的 FET	29
1.6 场效应管模块	31
1.6.1 模块的优势	32
1.6.2 模块的基本结构和一般特征	33
1.6.3 模块的常见种类:Module、IPM、PIM	34
1.6.4 MCM、SIP/SOP	36
1.6.5 板级封装	37
1.7 场效应管的发展近况	39
1.7.1 小型化封装	39
1.7.2 低功耗趋势	40
1.7.3 低电压规格趋势	41
第2章 实践初步	43
2.1 认识电路中的 VMOS	43
2.2 用万用表简单判别 FET	44
2.2.1 一般原则与适用范围	44
2.2.2 根据外形和型号判别 FET 的类型和主要技术规格	45
2.2.3 用万用表判别 VMOS 的引脚和好坏	45
2.2.4 用万用表判别 JFET 的引脚	49
2.3 花 10 元钱做两个 FET 的简单实验	49
2.3.1 VMOS 实验:工频同步整流电路	49
2.3.2 JFET 实验:甲类耳放	55
2.4 为避免在电路实验中炸管准备一些简单的工具	60
2.4.1 用接触式调压器构建实验电源	60
2.4.2 为驱动电路和控制电路准备单独的直流电源	62
2.4.3 电炉丝,方便易用的假负载与小阻值的大功率电阻	63
第3章 VMOS 的技术参数	65
3.1 极限参数: V_{DSS} 、 I_{D} 、 P_{D} 、SOA、 T_{A}	65
3.1.1 电压规格: V_{DSS} 、 V_{DS} 、 BV_{DSS} 、 $V_{(\text{BR})\text{DSS}}$	66
3.1.2 电流规格: I_{D} 及其 I_{DF} 、 I_{DM}	67

3.1.3	温度参数: T_J 、 T_C 、 T_A 、 T_{ch} 、 T_{STG} 、 T_L	68
3.1.4	功率规格: P_D 、 P_{tot} 、 I_{DR} 、 I_S	69
3.1.5	SOA	70
3.1.6	SOA 的实际意义	73
3.1.7	E_A 、 E_{AR} 、 E_{AS} 、 I_{AR} 、 dV/dt	73
3.1.8	极限参数的一般应用: 降额因素	76
3.2	热传导参数: $R_{\theta JC}$ 、 $R_{\theta CS}$ 、 $R_{\theta JA}$ 、 $R_{\theta JCD}$ 、 $R_{\theta CA}$	77
3.2.1	定 义	77
3.2.2	热欧姆定律	78
3.3	电参数	79
3.3.1	通态电阻: $R_{DS(ON)}$	80
3.3.2	跨导: g_{fs} 、 $ Y_{fs} $ 、 g_m	81
3.3.3	结电容 C_{gd} 、 C_{gs} 、 C_{ds} 与分布参数 C_{iss} 、 C_{rss} 、 C_{oss}	83
3.3.4	开关参数 t_{on} 、 $t_d(on)$ 、 t_r 、 t_{off} 、 $t_d(off)$ 、 t_f	85
3.3.5	栅电荷 Q_g 、 Q_{gs} 、 Q_{gd}	87
3.3.6	体二极管的技术参数 V_{SD} 、 I_S 、 t_{rr} 、 Q_{rr} 、 I_{SM} 、 I_{RRM}	91
3.3.7	技术手册中的其他电参数	94
第 4 章	JFET 的技术参数	97
4.1	小功率 JFET 的技术参数	97
4.1.1	小功率 JFET	97
4.1.2	小功率 JFET 技术参数概览	98
4.1.3	小功率 JFET 部分技术参数概述	99
4.2	功率 JFET 的技术参数	104
4.2.1	用于射频功率放大的功率 JFET	104
4.2.2	VFET 的技术参数	110
第 5 章	基本电路	113
5.1	场效应管放大器的仿真模型	113
5.2	电压放大器的分类	116
5.3	功率放大器与工作点	118
5.3.1	A 类、AB 类、D 类、C 类及其他	119
5.3.2	晶体管的工作点	120

5.3.3 基本电路形式	122
5.4 电路拓扑的基本类型	124
5.4.1 全桥(H桥)	124
5.4.2 半 桥	129
5.4.3 无处不在的推挽	130
5.4.4 Totem-Pole(图腾柱),桥接	131
5.4.5 单 管	132
5.4.6 三相桥	133
5.5 模块内部的等效电路	133
5.6 开关电源的常见类型	135
5.6.1 开关电源的一般分类	135
5.6.2 电感式开关电源的一般原理	136
5.6.3 电感的工作模式:CCM 与 DCM	137
5.6.4 AC-DC 与 DC-DC 开关电源	139
5.6.5 Charge Pump(电荷泵)	140
5.7 隔离型 DC-DC 开关电源的常见电路拓扑	142
5.7.1 Forward(正激)拓扑	142
5.7.2 Flyback(反激)拓扑,RCC	143
5.7.3 Half Bridge(半桥)拓扑,LLC(HB-LLC)	145
5.7.4 Push-Pull(推挽)拓扑,Royer	147
5.7.5 Full Bridge(全桥)拓扑	149
5.7.6 Dual Switch Forward(双管正激)拓扑	149
5.7.7 Active Clamp(有源钳位)拓扑	150
5.8 隔离型开关电源中的变压器	151
5.8.1 变压器的一般分析方法——磁路	152
5.8.2 理想的变压器	154
5.8.3 实际的变压器,励磁电感	155
5.8.4 实际变压器的漏感	156
5.8.5 实际变压器的功耗	157
5.9 非隔离型 DC-DC 开关电源的常见电路拓扑	158
5.9.1 Boost(升压)拓扑	158
5.9.2 Buck(降压),斩波	159

5.9.3	Buck-boost(升-降压)拓扑	159
5.9.4	$\hat{C}uk$ (丘克)、Cuk	160
5.9.5	SEPIC	161
5.9.6	Zeta	161
5.9.7	Sync Buck(同步降压)拓扑,同步整流	162
5.9.8	Multi-Phase Sync Buck(多相同步降压)拓扑	164
5.9.9	Split-Pi (Boost-Buck)	165
5.10	软开关	166
5.10.1	软开关	166
5.10.2	突波吸收	168
5.10.3	突波的抑制方法	170
5.10.4	突波吸收电容	172
5.11	多电平变换	173
5.11.1	多电平变换的常见拓扑类型	174
5.11.2	多电平变换拓扑的基本构成与特点	175
5.11.3	多电平变换拓扑的基本驱动方法	178
5.12	VMOS 的驱动	179
5.12.1	VMOS 的开通与关断	179
5.12.2	直接驱动 VMOS	182
5.12.3	不隔离的高边驱动	185
5.12.4	栅极驱动的优化	189
5.12.5	栅极的隔离驱动	191
5.12.6	集成化的栅极驱动器件	195
5.13	VMOS 的串联与并联	197
5.13.1	VMOS 的并联	197
5.13.2	VMOS 的串联	200
第 6 章	范例电路	203
6.1	基于双栅极 MOSFET 的广播调谐器高频头	203
6.1.1	简介	203
6.1.2	CT-7000 的高频头电路	205
6.2	给大功率 D 类功放供电的开关电源	209

6.2.1 简介	209
6.2.2 电路架构	210
6.2.3 主开关电源的 AC-DC 部分	212
6.2.4 主开关电源的 DC-DC 部分	217
6.2.5 副开关电源	225
6.3 全分立元件的 UCD 大功率 D 类功放	232
6.3.1 UCD 功放电路	232
6.3.2 原理概述	234
6.3.3 电路工作条件与元器件的选择	236
6.4 CCFL 背光电源	241
6.4.1 LCD、CCFL、LCD 显示面板、CCFL 逆变电源	241
6.4.2 19 英寸 LCD 显示面板的 CCFL 逆变电源	242
6.4.3 输入输出特性,灯管决定逆变电源的基本技术规格 ..	244
6.4.4 FAN7311	245
6.4.5 FAN7311 的主要工作参数	247
6.4.6 触发调光与线性调光	248
6.4.7 灯管的保护	251
6.4.8 谐 振	252
6.5 电动自行车充电器	253
6.5.1 电路原理	254
6.5.2 UC3842	257
6.5.3 功率开关管 STP9NK90Z	260
6.5.4 二极管	262
附录 1 缩略语	263
附录 2 VMOS 技术参数符号简表	269
附录 3 常见电荷泵 IC	272
参考文献	274

第 1 章 认识场效应管

除了自身功耗偏高,电子管仍然是目前性能非常优秀的电子器件,在某些领域仍然不可替代,尤其是高频、高压领域。要问哪一种半导体器件可以和电子管匹敌,与之最接近的,则非 FET(Field Effect Transistor,场效应晶体管)莫属。

FET 的发展历程虽然显得有些曲折,在一般民用产品中,也不如 BJT(Bipolar Junction Transistor,双极性晶体管)和 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor,绝缘栅双极晶体管)广泛,不过随着 D 类放大器和平板电视的普及,在民用产品中的应用,FET 已经超过 IGBT 了。

1.1 身边的场效应管

1.1.1 从麦克风说起

麦克风是英文“Microphone”的译音,也称为微音器、微型话筒。话筒的功能是进行“声→电”转换,直接进行“声→电”转换的部件是拾音器。根据“声→电”转换的原理不同,拾音器主要有电磁式(动磁式)、动圈式、电容式三种。前两者是基于磁场原理,利用的都是线圈切割磁力线进行机械能→电能的转换,所不同的是,电磁式是磁体动、线圈固定,动圈式是线圈动、磁体固定;电容式则是基于电场原理,利用电场的变化进行“声→电”的转换。

一个平板式电容所储存的电荷 $Q=CU$,其中 C 为电容的容量, U 为电容两端的电压。利用电容的一个能够活动或者振动的极板作为话筒的拾音器,声能会引起极板的前后移动,相当于电容的两个极板的距离发生了变化,电容的容量 C 也会发生相应的变化。

如果保持 Q 不变,电容量的变化就会引起端电压 U 的变化,这个电压的变

化就实现了“声→电”转换。普通的电容式拾音器,为了保持 Q 不变,就需要给拾音器提供一个十分稳定的电源才能保证拾音质量,如果采用驻极体材料,利用其自身稳定存电(荷)的特性,就可以省略上述电源。

某些材料在加上电荷后可以长时间保存住这些电荷,这就是驻极体(Electret)材料,也叫永电体,许多有机材料(石蜡、硬质橡胶、碳氢化合物、固体酸等)和无机材料(钛酸钡、钛酸钙等)都可以制成驻极体。

但是仅仅有了驻极体材料还不够,因为无论是普通的电容式话筒还是驻极体电容式话筒,输出阻抗都很高(兆欧级),输出的信号也比较微弱(微伏级),显然这样的拾音器如果要和放大器匹配的话,需要高输入阻抗的低噪声放大器。

双极性晶体管难以满足上述要求,电子管则没有问题,但是它的体积大,耗电量大,如果和电容式拾音器放在一起,体积是个难以解决的问题,而且话筒一般需要有相当长度的引线,这样的拾音器如果通过比较长的引线与放大器相连,很容易引入外界干扰噪声,同时供电也是个问题。

能够满足输入阻抗和体积以及耗电要求的,就是FET。

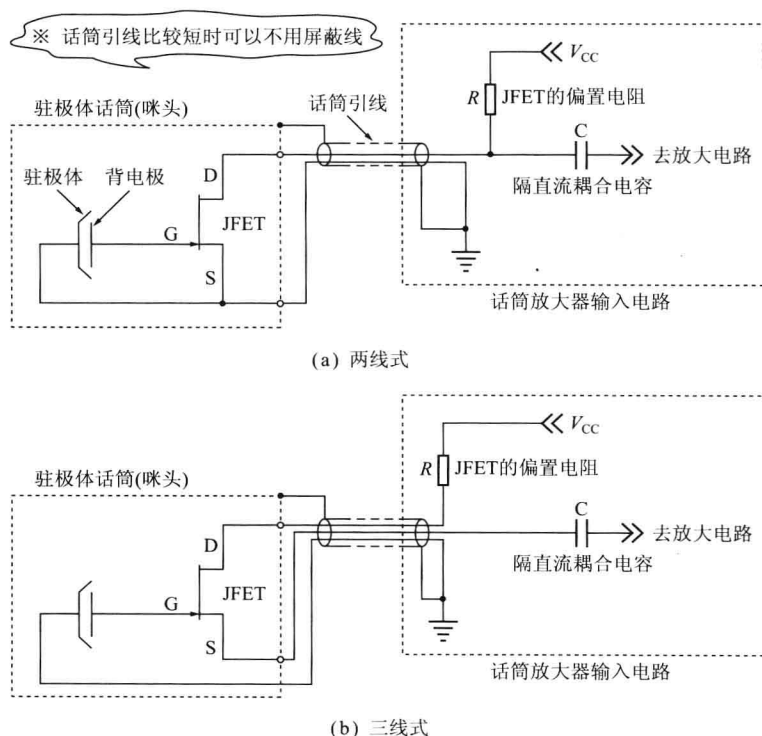


图 1.1 驻极体电容话筒的内部等效电路

现在广泛使用的驻极体话筒实际上是基于 FET 放大器的一个拾音器电路组件,有两线式(两个引出线)和三线式两种,内部电路形式如图 1.1 所示。常见的是两线式,三线式需要多一根引线,但是动态指标更为优秀。图中的 FET 具体来说是 N 沟道 JFET(Junction gate Field-Effect Transistor,结型场效应管)。

手机、PC 上的耳麦、MP3 和 MP4 上的话筒、数字相机和摄像机上的话筒、固定电话上的话筒大都属于驻极体话筒,也称为 ECM(Electret Condenser Microphone),这些话筒中无一例外地采用了 JFET。

与常见的 BJT 需要基极驱动电流不同,如果开关频率不是太高,JFET 需要的驱动电流几乎可以忽略,属于电压控制型器件,即开/关在理论上只需要一个合适的电压而不需要电流,这也是 JFET 输入阻抗比较高的内在原因。

1.1.2 打开一块手机的锂电池

手机中的电池大致可以分为锂离子电池和聚合物锂电池,早期的锂电池以前者居多,现在则以后者居多。无论哪一种锂电池,如果揭开它的外皮,就会发现它的内部不仅仅有锂电池(电芯),还有一块窄长条的电路板,如图 1.2 所示。

锂电池的电芯并不是直接和我们所使用的手机相连,而是通过这块小小的电路板和电池相连,这就是锂电池保护板。锂电池保护板既对充电过程进行保护,也对放电过程进行保护,图 1.2(a)就是一块揭开外皮的手机锂电池。

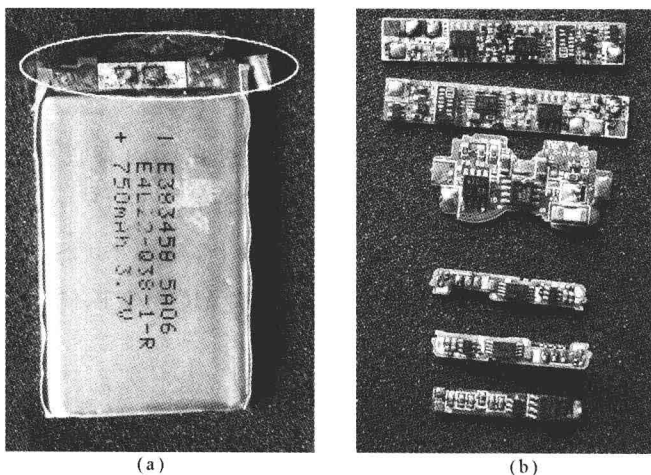


图 1.2 揭开外皮的手机锂电池和各种锂电池保护板

不仅仅是手机中的锂电池内置了保护板,MP3、笔记本电脑等采用锂电池的设备,多数也是内置有保护板,图 1.2(b)上面的两个就是笔记本电脑中锂电池的保护板,第三个是某便携设备中锂电池的保护板,接下来的三个就是手机锂电池中的保护板。

图 1.3 是一个典型的锂电池保护板电路原理图。

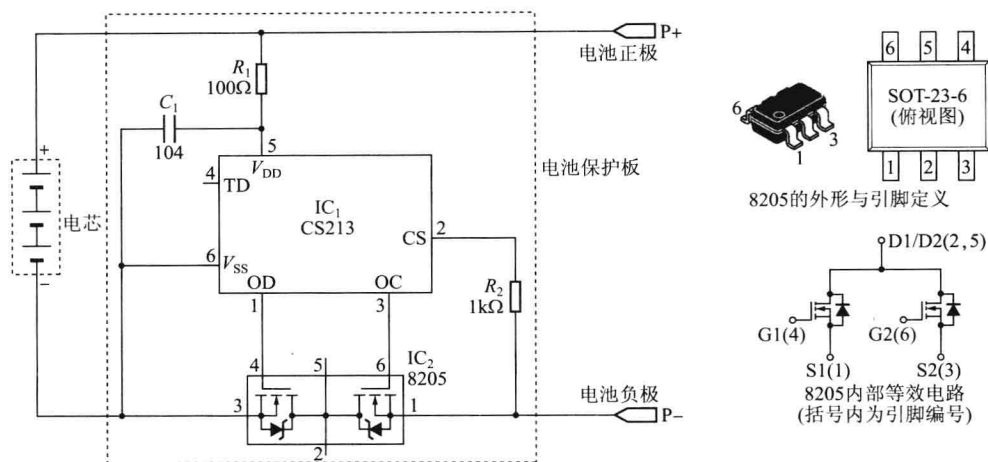


图 1.3 锂电池保护板的一种电路原理图

锂电池保护板一般由控制 IC 和两个功率开关管组成,这两个功率开关几乎无一例外地采用了 FET,只是与驻极体话筒中的有所不同,是 N 沟道的功率 MOSFET (Metallic Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 金属-氧化物-半导体场效应晶体管),而且大都是 VMOS (V-shape Vertical Metal Oxide Semiconductor, V 形槽栅、垂直沟道 MOSFET)。

VMOS,这个名称是不是有些熟悉?

VMOS 这个名称尽管有它的专门含义,不过在国内有它更为广泛的含义,如果没有特别说明,通常是指所有的功率 MOSFET,即“Vertical Metal Oxide Semiconductor”(垂直沟道 MOSFET),而实际上,功率 MOSFET 可并不仅仅是只有 VMOS 一种,但是目前业界所用的功率 MOSFET,除了频率很高的射频领域,VMOS 是绝对的主流。

图 1.3 中的两个功率开关管构成双向控制开关,分别对充电与放电过程中过流情况进行保护,因此如果短路手机锂电池的两极,电池就会中止电流输出。两个功率开关集成到了一个封装之中,有点对管的意思,不过这里并不是为了保证两个晶体管特性的一致性,而是为了减小体积。目前将两个功率晶体管和

控制 IC 集成到单一封装中的产品已经广泛开始应用,主要的目的是为了减少焊点,提高生产效率。

1.1.3 运算放大器

运算放大器是最常见的通用 IC 之一,简称运放。从外表看,NE5532 与 TL082 并无明显不同,但是从内部来看,二者的确有很大的区别。

TL082 是采用 JFET 为输入级的运算放大器,如图 1.4 左侧的阴影部分所示,右侧阴影部分是恒流源,用 JFET 作恒流源也曾经很常见。

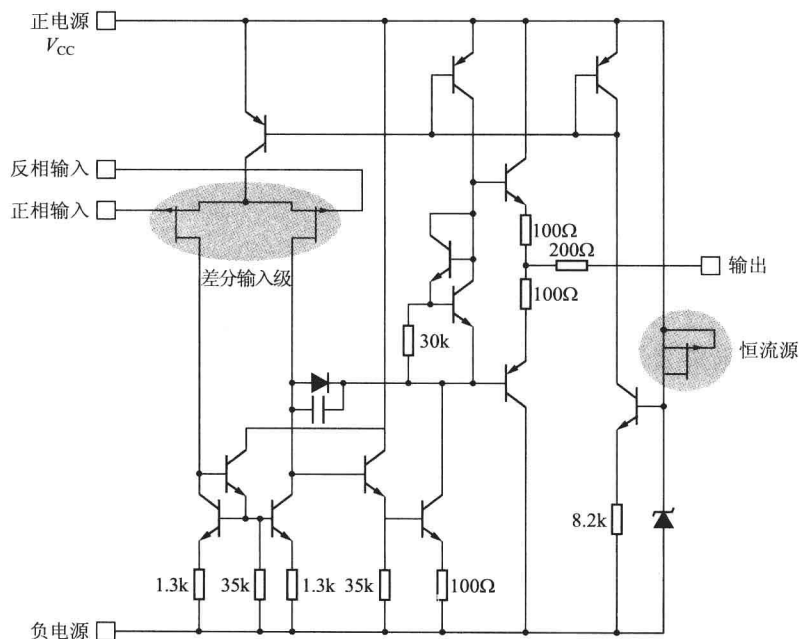


图 1.4 TL082 中一个运放的内部等效电路图

TL082 是双运放,包含两个完全相同的运放(实际上还是略有差别),属于系列运放产品,与之同系列的有单运放 TL081、四运放 TL084,比这个系列性能更为优秀的是 TL072 系列,“TL”原本是 TI 公司的产品前缀,不过现在很多制造商生产的兼容产品前缀也是 TL。

以 JFET 为输入级的运放算是运放家族中的少数,常见的还有 LF353。

1.2 场效应管是如何工作的

要想弄清楚场效应管是如何工作的,首先需要明白什么是半导体以及它们的特性。

1.2.1 N型、P型半导体与N+型、P-型半导体

就材料的导电性而言,大致可以分为绝缘体、半导体、导体三大类(图1.5),无论哪种材料,都有一定的电阻,另外还有一类没有电阻的“超导体”,只是目前在常温条件下还没有实用化。这三类材料之间并无绝对的界限,一定条件下是可以转化的。

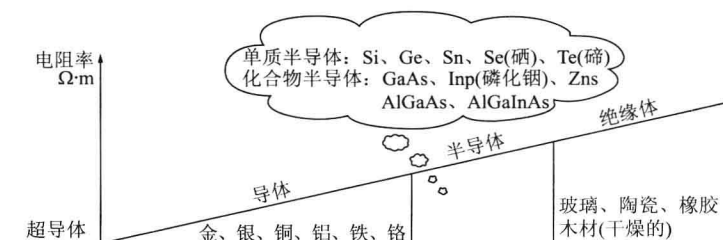


图 1.5 材料的导电性

材料的导电性是由材料中的自由电子(Extra electron)的数量决定的。从能量的角度来看,自由电子的能量比较高,因此在外力的作用下(电场等)可以自由移动,如果将它们集中起来,就是导带(Conduction Band),剩下的部分就是价带(Valence Band),参见图 1.6。价带的电子如果获得足够的能量,也能够变成导带的自由电子。从价带到导带之间的(能量)差(距离)称为能隙。

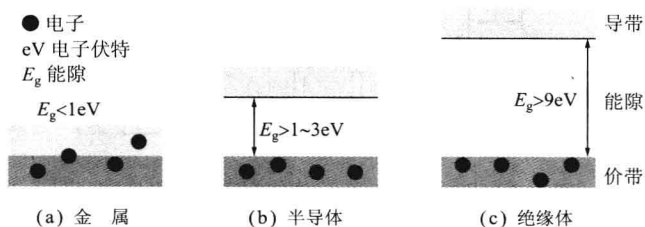


图 1.6 三类材料的能隙

导体(一般为金属材料)的能隙非常小,在室温下,只需很小的能量价带的电子就能够很容易跳跃至导带而导电;绝缘体的能隙比较大(通常大于 $9eV$),电子很难跳跃至导带,所以不导电;半导体的能隙约为 $1 \sim 3eV$,介于导体和绝缘体之间,只要给予适当的能量或者改变能隙的大小,就能够导电。

在半导体中加入合适的“杂质”就可以改变和控制它的能隙大小。如果在纯 Si(硅)中掺杂(Doping)少量的 As(砷)或 P(磷),二者的最外层有五个电子,而 Si 外层只有 4 个电子,因此就会多出一个自由电子,这样就形成了“N”型半