

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光子系列

半导体集成电路 (第2版)

Semi-Conductor Integrated Circuits (Second Edition)

朱正涌 张海洋 朱元红 编著
Zhu Zhengyong Zhang Haiyang Zhu Yuanhong

清华大学出版社

清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列

半导体集成电路 (第2版)

Semi-Conductor Integrated Circuits (Second Edition)

朱正涌 张海洋 朱元红 编著
Zhu Zhengyong Zhang Haiyang Zhu Yuanhong

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书全面介绍了半导体集成电路的分析与设计方法。全书共分为4个部分,第1部分(第1~3章)介绍了集成电路的典型工艺、集成电路中元器件的结构、特性及寄生效应;第2部分(第4~11章)为数字集成电路,讨论了常用的双极和MOS集成电路的电路结构、工作原理和版图形式;第3部分(第12~16章)为模拟集成电路,介绍了模拟集成电路中的基本单元电路及常用的模拟集成电路,如集成运算放大器、集成稳压电源电路及开关电容电路、A/D、D/A变换电路等;第4部分(第17~22章)为集成电路设计,举例介绍了集成电路的设计方法和集成电路的计算机辅助设计,其中重点论述了集成电路的版图设计以及集成电路的可靠性设计和可测性设计。每章后面都附有习题。

本书可作为高等院校微电子学和电子科学与技术专业本科生的教材,也可供有关专业的本科生、研究生以及工程技术人员阅读参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

半导体集成电路/朱正涌,张海洋,朱元红编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2009.4
(清华大学信息科学技术学院教材——微电子光电子系列)
ISBN 978-7-302-18512-3

I. 半… II. ①朱… ②张… ③朱… III. 半导体集成电路—集成电路工艺—高等学校—教材 IV. TN430.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第139488号

责任编辑:陈国新

责任校对:时翠兰

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:32.75 字 数:709千字

版 次:2009年4月第2版 印 次:2009年4月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.80元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:030547-01

出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届学生试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

第2版说明

第2版在以下方面做了修改和补充:

(1) 由于集成技术的发展,原来在双极集成电路中起过积极作用的 ECL、 I^2L 电路,已用得较少,所以在第2版中只介绍这两种电路的基本单元的结构和工作原理,以及 TTL、ECL、 I^2L 之间的接口电路;由于 ECL、 I^2L 的版图设计有其特点,且对 TTL 的版图设计有参考价值,故保留了 ECL、 I^2L 的版图设计部分。

(2) 由于版图设计对于集成电路的面积和性能的优化起着越来越重要的作用,所以在第2版中加强了版图设计方面的内容,这部分内容由从事集成电路版图设计工作的朱元红同志编写。

(3) Flash 在存储器中起着越来越重要的作用,所以在第2版中增加了这一方面的内容,这部分内容由多年从事存储器测试方面工作的张海洋同志编写。

(4) 由于集成技术的发展,集成电路的集成度越来越高,其功耗越来越大,其可靠性问题也越来越严重,所以在第2版中增加了低功耗设计方面的内容。

(5) 为了便于读者自学,增加了一些基础知识的内容。

编 者

2008年9月

第1版前言

本教材按“1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划”,由“全国高校微电子技术专业教学指导委员会”编审推荐出版。责任编委为陈建新教授。

清华大学微电子学研究所张建人与贾松良教授于1987年分别出版了《MOS集成电路分析与设计基础》(张建人编著,电子工业出版社出版)和《双极集成电路分析与设计基础》(贾松良编著,电子工业出版社出版)两本书,作为清华大学微电子学专业本科生MOS集成电路和双极集成电路两门课程的教材。1992年开始,为适应教学改革的需要,我们决定把这两门课程合并为一门,以精简学时,减少不必要的重复。我们在这两本教材的基础上于1995年改编为“集成电路分析与设计”讲义,同时在体系和内容上作了较大的变动,并对元器件和单元电路的版图结构、集成电路的版图设计以及可靠性设计和可测性设计方面作了较多的补充,以反映微电子技术近年来的飞速发展。

本书是在上述讲义的基础上改编而成的,改编时结合本所多年来在教学、科研和科技开发中的一些成果,增加了部分新内容,使教材内容更实用、具体和生动。

本书共分4部分,第1部分(第1~3章)为基础知识,主要介绍双极集成电路、MOS集成电路和Bi-CMOS电路的典型制造工艺,各制造工艺生成的集成电路元器件的结构,集成电路元器件的形成过程,元器件的特性及其寄生效应等,作为了解后续部分章节的基础。第2部分(第4~11章)介绍双极和MOS数字集成电路(包括双极TTL、ECL和 I^2L 电路,各种MOS和CMOS数字电路)的特性以及分析方法,各种逻辑系列之间的电平转换电路,使读者对各种电路的特点及适用的场合有一个基本的了解,以便在实际工作中能选用合适的电路。第3部分(第12~16章)介绍模拟集成电路,首先介绍模拟集成电路中的基本单元电路,如各种放大电路、有源负载、恒流源电路、电压源电路、电平位移电路、双端输出变单端输出电路、输出级及其保护电路等。这些常用的单元电路是分析各种模拟集成电路的基础。接着介绍集成运算放大器、集成稳压电源电路及开关电容电路、A/D、D/A变换电路等几种常用的模拟集成电路。第4部分(第17~22章)专门介绍集成电路设计,即如何实现设计目标。首先介绍了集成电路的版图设计规则,给出了双极集成电路和MOS集成电路版图设计规则的部分图例。接着,以74HC139 MOS集成电路和5JZ12双极集成电路为例,详细介绍集成电路正向设计的全过程。然后,以74HC193 MOS集成电路为例,介绍如何进行MOS集成电路的芯片解剖。此外,还介绍如何识别双极集成电路的版图。此后又详细介绍

集成电路的各种设计方法,比较各种设计方法的优缺点,并对集成电路的可靠性设计和可测性设计进行了专门的介绍。最后介绍集成电路计算机辅助设计中常用的一些工具以及计算机辅助设计的过程,并对 VHDL 做了简介。

本书取材内容兼顾了基础知识和集成电路的最新发展(如集成电路的可靠性、可测性设计,VHDL 等),并重点介绍集成电路设计特别是版图设计。因此在本书中用了较多的篇幅来描述元器件的结构图、版图,分析各种元器件的特性及寄生效应以及怎样减小寄生效应,并且以具体产品为例,介绍集成电路的正向设计和逆向设计,使读者对集成电路的内涵及集成电路的分析、设计方法有所了解,为分析和设计集成电路打下基础。

本书由成都电子科技大学张开华教授主审,他对原稿提出了许多宝贵的修改意见。在本书的编写过程中,引用了前述两本教材的部分内容,第 20 章主要参考了杨之廉教授编写的《超大规模集成电路设计的方法学导论》^[9],编者向他们深表谢意。此外,张蓬同志为书稿绘制了原稿的部分插图,贺祥庆、褚彤同志编写了部分习题,宋文忠和朱元红同志为原书稿的录入做了大量的工作。编者向他们表示衷心的感谢。

由于集成电路的发展非常迅速,加上作者的水平有限,书中定有不少不足和错误,热诚欢迎读者批评指正。

编 者

2000 年 8 月于清华园

目 录

第 1 章 集成电路的基本制造工艺	1
1.1 双极集成电路的基本制造工艺	1
1.1.1 典型的双极集成电路工艺	1
1.1.2 双极集成电路中元件的形成过程和元件结构	2
1.2 MOS 集成电路的基本制造工艺	5
1.2.1 N 沟道硅栅 E/D MOS 集成电路制造工艺	5
1.2.2 CMOS 集成电路制造工艺	7
1.3 Bi-CMOS 制造工艺	11
1.3.1 以 CMOS 工艺为基础的 Bi-CMOS 制造工艺	12
1.3.2 以双极工艺为基础的 Bi-CMOS 制造工艺	13
复习思考题	15
第 2 章 集成电路中的晶体管及其寄生效应	16
2.1 理想本征集成双极晶体管的埃伯斯-莫尔(EM)模型	16
2.2 集成双极晶体管的有源寄生效应	18
2.2.1 NPN 管工作于正向工作区和截止区的情况	18
2.2.2 NPN 管工作于反向工作区的情况	18
2.2.3 NPN 管工作于饱和区的情况	19
2.3 集成双极晶体管的无源寄生效应	20
2.3.1 集成 NPN 晶体管中的寄生电阻	21
2.3.2 集成 NPN 晶体管中的寄生电容	27
2.4 集成电路中的 PNP 管	29
2.4.1 横向 PNP 管	29
2.4.2 衬底 PNP 管	37
2.4.3 自由集电极纵向 PNP 管	38
2.5 集成二极管	39
2.5.1 一般集成二极管	39

2.5.2	集成齐纳二极管和次表面齐纳管	40
2.6	肖特基势垒二极管(SBD)和肖特基钳位晶体管(SCT)	41
2.6.1	肖特基势垒二极管	41
2.6.2	肖特基钳位晶体管	42
2.6.3	SBD 和 SCT 的设计	44
2.7	MOS 集成电路中的有源寄生效应	45
2.7.1	场区寄生 MOSFET	45
2.7.2	寄生双极型晶体管	46
2.7.3	寄生 PNP 效应	47
2.8	集成电路中的 MOS 晶体管模型	50
2.8.1	MOS1 模型	50
2.8.2	MOS2 模型	52
2.8.3	MOS3 模型	52
	复习思考题	53
第 3 章	集成电路中的无源元件	55
3.1	集成电阻器	55
3.1.1	基区扩散电阻	56
3.1.2	其他常用的集成电阻器	63
3.1.3	MOS 集成电路中常用的电阻	69
3.2	集成电容器	69
3.2.1	双极集成电路中常用的集成电容器	70
3.2.2	MOS 集成电路中常用的 MOS 电容器	71
3.3	互连(内连线)	72
3.3.1	铝连线	72
3.3.2	扩散区连线	73
3.3.3	多晶硅连线	73
3.3.4	铜连线	73
3.3.5	交叉连线	74
	复习思考题	75
第 4 章	晶体管-晶体管逻辑(TTL)电路	77
4.1	一般的 TTL 与非门	77
4.1.1	标准 TTL 与非门(四管单元)	77
4.1.2	54H/74H 五管单元与非门	79

4.1.3	六管单元与非门	79
4.2	STTL 和 LSTTL 电路	80
4.2.1	六管单元 STTL 与非门电路	80
4.2.2	低功耗肖特基 TTL(LSTTL)电路	81
4.3	LSTTL 门电路的逻辑扩展	82
4.3.1	OC 门	82
4.3.2	三态逻辑(TSL)门	84
4.4	ASTTL 和 ALSTTL 电路	85
4.5	中、大规模集成电路中的简化逻辑门	88
4.5.1	简化逻辑门	88
4.5.2	单管逻辑门	88
4.6	LSTTL 电路的版图设计	93
	复习思考题	93
第 5 章	发射极耦合逻辑(ECL)电路	100
5.1	ECL 门电路的工作原理	100
5.1.1	射极耦合电流开关	101
5.1.2	射极输出器	101
5.1.3	参考电压源	102
5.2	ECL 电路的版图设计特点	103
5.2.1	划分隔离区	104
5.2.2	元器件的设计	104
5.2.3	布局布线	105
	复习思考题	106
第 6 章	集成注入逻辑(I²L)电路	109
6.1	I ² L 电路基本单元的结构	109
6.2	I ² L 基本单元电路的工作原理	110
6.2.1	当前级的输出为 1 态时的情况	111
6.2.2	当前级的输出为 0 态时的情况	111
6.3	I ² L 电路的工艺与版图设计	112
6.3.1	I ² L 电路的工艺设计	112
6.3.2	I ² L 电路的版图设计	114
	复习思考题	118

第 7 章 MOS 反相器	119
7.1 自举反相器	119
7.2 耗尽负载反相器(E/D 反相器)	121
7.3 CMOS 反相器	122
7.3.1 CMOS 反相器的直流特性	122
7.3.2 噪声容限	125
7.3.3 开关特性	127
7.3.4 功耗	129
7.4 静态内部反相器的设计	132
7.4.1 有比反相器的设计	132
7.4.2 CMOS 反相器的设计	132
7.5 动态反相器	133
7.5.1 动态有比反相器	133
7.5.2 动态无比反相器	134
7.5.3 漏举电路	135
7.6 按比例缩小理论	136
7.6.1 器件和引线按 CE 理论缩小的规则	136
7.6.2 按比例缩小的 CV 理论	138
7.6.3 按比例缩小的 QCV 理论	139
复习思考题	140
第 8 章 MOS 基本逻辑单元	142
8.1 NMOS 逻辑结构	142
8.1.1 NMOS 或非门电路	142
8.1.2 NMOS 与非门电路	144
8.1.3 NMOS 组合逻辑电路	146
8.2 CMOS 逻辑结构	148
8.2.1 CMOS 互补逻辑	148
8.2.2 伪 NMOS 逻辑	149
8.2.3 动态 CMOS 逻辑	149
8.2.4 钟控 CMOS 逻辑	153
8.2.5 CMOS 多米诺逻辑	154
8.3 级联级的负载	155
8.4 影响门的电气和物理结构设计因素	157
8.4.1 MOS 管的串联和并联	157

8.4.2	衬偏调制效应	158
8.4.3	源漏电容	158
8.4.4	电荷的再分配	159
8.5	各种逻辑类型的比较	160
8.6	传输门逻辑	161
8.7	RS 触发器	162
8.7.1	NMOS RS 触发器	162
8.7.2	CMOS RS 触发器	164
8.8	时钟脉冲控制触发器	166
8.8.1	NMOS 结构的时钟脉冲控制触发器	166
8.8.2	CMOS 结构的时钟脉冲控制触发器	167
8.9	D 触发器	168
8.9.1	NMOS D 触发器	168
8.9.2	CMOS D 触发器	168
8.10	施密特触发器	170
	复习思考题	173
第 9 章	MOS 逻辑功能部件	175
9.1	多路开关	175
9.2	加法和进位链	176
9.2.1	组合逻辑加法器	177
9.2.2	传输门加法器	179
9.2.3	进位链	180
9.3	算术逻辑单元	182
9.3.1	以 E/D NMOS 反相器为主体的算术逻辑单元	182
9.3.2	以传输门为主体的算术逻辑单元	184
9.4	寄存器	185
9.4.1	双港寄存器	185
9.4.2	移位寄存器	185
9.4.3	堆栈移位寄存器	187
9.4.4	动态移位寄存器	187
	复习思考题	189
第 10 章	存储器	192
10.1	存储器的结构	193

10.2	掩模编程 ROM	194
10.3	现场可编程 ROM(PROM)	198
10.4	可擦除可编程 ROM(EPROM)	200
10.5	电可擦除可编程 ROM(E ² PROM)	201
10.5.1	TEE8502 的总体结构和工作模式	201
10.5.2	存储单元和存储矩阵	204
10.5.3	外围电路	206
10.6	静态随机存取存储器(SRAM)	218
10.7	动态随机存取存储器(DRAM)	228
10.8	闪存(Flash)	232
10.8.1	闪存的存储单元	233
10.8.2	NOR 型闪存	234
10.8.3	NAND 型闪存	243
10.8.4	SBC 和 MLC	246
	复习思考题	248
第 11 章	接口电路	249
11.1	双极逻辑系列间的接口电路	249
11.1.1	ECL 和 TTL 之间的接口电路	249
11.1.2	I ² L 和 TTL 之间的接口电路	253
11.2	TTL 和 MOS 逻辑系列间的接口电路	257
11.2.1	TTL 到 CMOS 的接口电路	257
11.2.2	CMOS 到 TTL 的接口电路	258
11.2.3	E/D NMOS 与 TTL 之间的接口电路	259
	复习思考题	259
第 12 章	模拟集成电路中的基本单元电路	260
12.1	单管、复合器件及双管放大级	260
12.1.1	双极晶体管复合器件及双管放大级	260
12.1.2	MOS 管放大级	265
12.2	恒流源电路	272
12.2.1	基本恒流源电路	272
12.2.2	双极型比例恒流源电路	274
12.2.3	精密匹配电流镜	275
12.2.4	温度稳定恒流源	275

12.2.5	小电流恒流源	276
12.2.6	威尔逊(Wilson)恒流源	277
12.2.7	PNP 恒流源	279
12.2.8	JFET 恒流源	281
12.3	偏置电压源和基准电压源电路	282
12.3.1	双极型三管能隙基准源	282
12.3.2	双极型二管能隙基准源	284
12.3.3	E/D NMOS 基准电压源	286
12.3.4	CMOS 基准电压源	290
12.4	有源负载	293
12.4.1	双极有源负载	293
12.4.2	MOS 有源负载	295
	复习思考题	296
第 13 章	集成运算放大器	300
13.1	运算放大器的输入级	300
13.1.1	双极晶体管射耦对差分输入级	301
13.1.2	MOS 源耦对差分输入级	303
13.2	输出级电路	308
13.2.1	双极型输出级电路	309
13.2.2	MOS 输出级电路	313
13.3	双极型集成运算放大器	316
13.3.1	741 型通用集成运放	316
13.3.2	其他特殊运放	317
13.4	MOS 集成运算放大器	318
13.4.1	MOS 集成运放的特点	318
13.4.2	CMOS 集成运放	324
13.5	集成运算放大器的版图设计	331
13.5.1	双极型集成运放的版图设计	331
13.5.2	MOS 集成运放的版图设计	334
	复习思考题	338
第 14 章	MOS 模拟开关及开关电容电路	343
14.1	MOS 模拟开关	343
14.1.1	单管增强型 NMOS 模拟开关	344

14.1.2	CMOS 模拟开关	347
14.2	开关电容等效电阻电路	347
14.2.1	并联型开关电容等效电阻电路	348
14.2.2	串联型开关电容等效电阻电路	349
14.3	开关电容积分器	350
14.4	开关电容低通滤波器	352
	复习思考题	353
第 15 章	集成稳压器	355
15.1	集成稳压器的基本结构	355
15.2	启动电路	356
15.2.1	JFET 启动电路	356
15.2.2	晶体管隔离启动电路	356
15.3	保护电路	357
15.3.1	调整管的过流及安全工作区保护	357
15.3.2	过热保护	359
15.4	三端固定输出电压式稳压电源	360
15.4.1	启动电路	362
15.4.2	保护电路	362
15.4.3	基准电压源和误差放大器	362
15.4.4	取样电阻	363
15.5	集成稳压器的版图设计	363
15.5.1	调整管的版图设计	363
15.5.2	集成稳压器版图设计的热对称考虑	367
	复习思考题	368
第 16 章	D/A, A/D 变换器	369
16.1	D/A 变换器的基本原理	369
16.2	D/A 变换器的基本类型	371
16.2.1	电流定标 D/A 变换器	372
16.2.2	电压定标 D/A 变换器	373
16.2.3	电荷定标 D/A 变换器	374
16.3	A/D 变换器的变换原理	376
16.3.1	A/D 变换器的方框图	376
16.3.2	主要变换误差	377

16.4	A/D 变换器的基本类型	379
16.4.1	积分型 A/D 变换器	379
16.4.2	逐次逼近式 A/D 变换器	382
	复习思考题	384
第 17 章	集成电路设计概述	388
	复习思考题	393
第 18 章	集成电路的正向设计	394
18.1	MOS 集成电路的正向设计	394
18.1.1	74HC139 电路简介	394
18.1.2	电路设计	395
18.1.3	工程估算	402
18.1.4	电路模拟	405
18.1.5	版图设计	408
18.1.6	版图检查	409
18.2	双极型集成电路的正向设计	409
18.2.1	双极型集成电路设计的特点	409
18.2.2	双极型集成电路中元件的图形设计	410
18.2.3	双极型集成电路的版图设计原则	414
18.2.4	双极型集成电路版图设计举例	416
	复习思考题	420
第 19 章	集成电路的芯片解剖	422
19.1	MOS 集成电路的芯片解剖	422
19.1.1	74HC193 芯片概况	422
19.1.2	芯片解剖过程	423
19.1.3	电路分析	424
19.1.4	逻辑功能的分析	426
19.1.5	版图设计规则的分析	431
19.1.6	抑制 Latch-up 效应的措施	433
19.1.7	版图的布局布线	435
19.2	双极型集成电路的芯片解剖	435
19.3	版图设计小结	437
	复习思考题	445

第 20 章 集成电路设计方法	449
20.1 全定制设计方法	449
20.2 符号法版图设计	449
20.3 半定制设计方法	452
20.3.1 标准单元设计法	452
20.3.2 门阵列设计方法	453
20.4 可编程逻辑器件(PLD)设计法	457
20.5 现场可编程门阵列(FPGA)设计法	460
复习思考题	462
第 21 章 集成电路的可靠性设计和可测性设计简介	463
21.1 可靠性设计	463
21.1.1 集成电路的固有可靠性	463
21.1.2 电路设计中提高可靠性的措施	465
21.1.3 版图设计中提高可靠性的措施	469
21.1.4 工艺设计中提高可靠性的措施	471
21.1.5 CMOS 电路低功耗设计概述	472
21.2 可测性设计	478
21.2.1 可测性设计的重要性	478
21.2.2 可测性设计简介	479
复习思考题	482
第 22 章 集成电路的计算机辅助设计简介	483
22.1 概述	483
22.2 集成电路 CAD 中常用的工具简介	485
22.2.1 器件模拟	485
22.2.2 电路模拟	486
22.2.3 逻辑模拟	488
22.2.4 版图设计阶段	491
22.3 VHDL 简介	491
22.3.1 VHDL 术语	492
22.3.2 VHDL 的主体结构	492
22.3.3 VHDL 描述举例	496
复习思考题	500
参考文献	501