

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19820061151824

UDC_____

厦 门 大 学
硕 士 学 位 论 文

新型 IGBT 器件的设计与建模
Design and Modeling of a Novel IGBT

杨玲玲

指导教师姓名: 李开航 副教授

专业名称: 微电子学与固体电子学

论文提交日期: 2009 年 6 月

论文答辩时间: 2009 年 6 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2009 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明，本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘要

绝缘栅双极晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)由于结合了 MOSFET 和 BJT 各自的优点,表现出开关速度快、饱和压降低和可耐高压、大电流等优良特性,是一种用途十分广泛的半导体功率器件,许多领域已经逐步取代了电力晶体管(GTR)和电力场效应晶体管(MOSFET)。目前,国内对 IGBT 产品的需求量日趋增多,但国内暂时还没有独立的生产厂家,所需的 IGBT 产品主要依赖进口,因此,开发和研制具有自主知识产权的性能优良的 IGBT 器件已成为迫切需要,本文鉴于此背景,努力和国内同行一道投入该领域中进行积极探索。

本文首先对 IGBT 的工作原理进行了简述,接着又简单介绍了半导体器件计算机模拟的相关知识。在对目前较为流行的 IGBT 器件结构载流子存储型槽栅 IGBT(CSTBT, Carrier-Stored Trench IGBT)分析的基础上,提出了一种新型的功率半导体器件 FH-TIGBT(Full Hole-barrier Layer Trench IGBT),在槽栅下新增的 N 型空穴阻挡层使得器件具有更低的饱和压降和抗短路能力,同时具有 CSTBT 的其他优点。本文在工艺上仿真实现了新型结构的 IGBT 器件,又进一步对其进行了器件模拟,仿真结果验证了其性能上的优越性。

此外本文还建立了 FH-TIGBT 的等效电路模型。在没有相应 IGBT 的 SPICE 模型库的前提下,利用等效的电路模型能更方便地实现相关电路的设计。通过合理的选择等效电路模型以及已知的器件特性曲线和有效的参数提取,使得所建立的模型与器件的性能有较好的吻合,得到与预期一致的合理结果。

关键词: 功率半导体器件; FH-TIGBT; 等效电路模型

Abstract

Combining the best attributes of both MOSFET and BJT, the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) shows many advantages, such as voltage driving, high switching speed, low saturation voltage, undertaking high voltage and high current. This semiconductor power device has found abroad applications, and gradually takes the place of GTR and MOSFET. At present the high performance IGBT is needed urgently. However, most IGBT come from import because no unaided manufacturer in our country can be found so far. As a result, nowadays many researchers have turned to designing and developing new advanced IGBT devices.

In this thesis, we firstly introduce structure and principle of the device, and then briefly address simulation of the semiconductor device. Based on CSTBT, a new structure of IGBT has been proposed, which is called FH-TIGBT (Full Hole-barrier Layer Trench IGBT). With a layer of type N under the trench gate, this new device costs lower saturation voltage, but owns stronger ability of carrying out short circuits comparing to CSTBT. Besides, it contains all other advantages of CSTBT. The process simulation of the novel device has been implemented in this work, which verifies advantages of the new device.

We build an equivalent circuit model of FH-TIGBT. Without IGBT model in SPICE, this equivalent circuit model can be used in the circuit design expediently. The implementation contains device characters simulated, effectual parameters extracted and equivalent circuit model refined. We verified that the equivalent circuit model matches the characters of the new device perfectly. From the simulation results, the advantages of this novel semiconductor device can be seen obviously.

Keywords: Power Semiconductor Device; FH-TIGBT; Equivalent Circuit Model

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 本课题的主要内容及意义.....	3
1.3 本章小结.....	4
第二章 IGBT 器件的结构及工作原理	5
2.1 IGBT 的结构及分类.....	5
2.2 IGBT 的工作原理.....	10
2.3 IGBT 的特性分析.....	12
2.3.1 IGBT 的静态特性.....	12
2.3.2 IGBT 的动态特性.....	13
2.4 IGBT 的闩锁效应和安全工作区.....	16
2.4.1 闩锁效应.....	16
2.4.2 安全工作区.....	16
2.5 本章小结.....	17
第三章 器件物理模型和工艺仿真技术	18
3.1 半导体器件模拟概述.....	18
3.2 半导体器件物理模型.....	20
3.2.1 半导体基本方程.....	20
3.2.2 器件参数的物理模型.....	21
3.2.3 器件模型的网格.....	25
3.2.4 数值技术.....	25
3.3 器件工艺仿真模型.....	26
3.4 SILVACO 仿真工具.....	29
3.4.1 Athena 系统简介.....	30
3.4.2 Atlas 系统简介.....	30
3.4.3 实例仿真.....	31

3.5 本章小结.....	37
第四章 新型 IGBT 器件的设计及特性分析.....	38
4.1 新型器件的研究背景.....	38
4.2 CSTBT 简介.....	39
4.3 FH-TIGBT 的结构设计.....	40
4.4 FH-TIGBT 的仿真.....	41
4.4.1 仿真简介.....	41
4.4.2 FH-TIGBT 的工艺仿真.....	42
4.4.3 FH-TIGBT 的器件仿真.....	47
4.4.4 FH-TIGBT 的参数优化.....	54
4.5 本章小结.....	57
第五章 FH-TIGBT 的等效电路模型.....	58
5.1 IGBT 的模型简介.....	58
5.2 IGBT 的等效电路模型.....	58
5.3 FH-TIGBT 的参数提取.....	59
5.3.1 MOS 部分的参数提取.....	59
5.3.2 BJT 部分的参数提取.....	65
5.3.3 受控电阻的确定.....	66
5.4 FH-TIGBT 模型的特性模拟.....	67
5.4.1 静态特性的模拟.....	67
5.4.2 动态特性的模拟.....	69
5.5 本章小结.....	69
第六章 设计总结与展望.....	70
参考文献.....	72
致谢.....	75
论文发表情况.....	76

Contents

Chapter1 Exordium	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Content and Significance of this thesis.....	3
1.3 Conclusion.....	4
Chapter2 Structure and Principle of IGBT	5
2.1 Structure and Classification of IGBT.....	5
2.2 Principle of IGBT.....	10
2.3 Performance of IGBT.....	12
2.3.1 Static Performance.....	12
2.3.2 Dynamic Performance.....	13
2.4 Latch-up and Safe Operation Area.....	16
2.4.1 Latch-up.....	16
2.4.2 Safe Operation Area.....	16

2.5 Conclusion.....	17
Chapter3 Physical Models of Devices and Process Simulation.....	18
3.1 Models of Semiconductor Devices.....	18
3.2 Physical Models of Devices.....	20
3.2.1 Basic Equations.....	20
3.2.2 Physical Models of Parameters.....	21
3.2.3 Grids of Models.....	25
3.2.4 Numerical Technology.....	25
3.3 Models of Process Simulation.....	26
3.4 SILVACO' s Simulation Tools.....	29
3.4.1 Athena Introduction.....	30
3.4.2 Atlas Introduction.....	30
3.4.3 Simulation Example.....	31
3.5 Conclusion.....	37
Chapter4 Design and Analysis of a Novel IGBT.....	38
4.1 Background.....	38
4.2 CSTBT.....	39
4.3 Structure Design of FH-TIGBT.....	40
4.4 FH-TIGBT Simulation.....	41
4.4.1 Introduction.....	41
4.4.2 Process Simulation.....	42
4.4.3 Device Simulation.....	47
4.4.4 Optimization.....	54
4.5 Conclusion.....	57
Chapter5 Equivalent-circuit Model of FH-TIGBT.....	58
5.1 Introduction of IGBT' s Models.....	58
5.2 Equivalent-circuit Model.....	58
5.3 Extract Parameters.....	59

5.3.1 Extract Parameters for MOS-segment.....	59
5.3.2 Extract Parameters for BJT-segment.....	65
5.3.3 Make sure of Controlled Resistance.....	66
5.4 Performance Simulation of Equivalent-circuit Model.....	67
5.4.1 Static Performance Simulation.....	67
5.4.2 Dynamic Performance Simulation.....	69
5.5 Conclusion.....	69
Chapter6 Conclusion and Prospect.....	70
References.....	72
Acknowledgement.....	75
Publications.....	76

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 引言

半导体功率器件是电力电子系统进行能量控制和转换的基本电子元器件^[1]，近年来，随着微电子技术的发展，以栅控功率器件与智能功率集成电路为代表的现代功率半导体技术得到了迅速的发展，极大地推动了电力电子技术的进步。电力电子技术的不断进步反过来又促使功率半导体技术向高频、高温、高压、大功率及智能化、系统化方向发展。

上世纪 50 年代初，第一只工业用普通晶闸管的研制标志着电力电子技术开始进入由半导体功率器件构成的电能变换和控制的新时代。从此，以功率变换器为核心的电力电子变换装置几乎应用于现代工业的各个领域，标志着现代电力电子技术的诞生。同时，诸多研究工作者为研制高性能的功率器件做出了不懈的努力，并已取得了令世人瞩目的成就。60 年代，晶闸管的电压电流容量不断提高，由普通晶闸管很快就衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管（RCT）、双向晶闸管（TRIAC）以及不对称晶闸管（ASCR）等，形成了一个 SCR 家族。60 年代后期，可关断晶闸管 GTO 实现了门极可关断功能，并使斩波工作频率扩展到 1kHz 以上。70 年代末，随着 MOS 集成电路的发展，诞生了 MOS 型半导体功率器件。功率 MOS 是电压控制器件，驱动电路更简单，在低压、高频系统中得到广泛的应用。但是，由于没有类似于双极型器件的少数注入产生的电导调制效应，随着器件击穿电压的增大，其导通电阻急剧增大，极大地限制了功率 MOS 击穿电压的提高，也限制了它在高压系统中的应用。80 年代初，试图把 MOS 与 BJT 技术集成起来的研究导致称为绝缘栅双极晶体管（IGBT）的新型功率器件的发明。IGBT 集 MOSFET 的栅极电压控制特性和 BJT 的低导通电阻特性于一身，具有电压控制、输入阻抗大、驱动功率小、导通电阻小开关损耗低及工作频率高等优点，并具有类似 MOSFET 的宽 SOA 特性，是近乎理想的半导体大功率开关器件，有着广阔的发展和前景。80 年代末，商品化的 IGBT 单管水平已经达到 20~50A/80~1000V。由于器件结构的改进、参数的调整以及工艺水平的提高，到 90 年代初期，IGBT 模块已达到 300A/500~1200V 的水平。如今，IGBT 模块已经有 800A/6500V、1000A/4500V、1200A/3300V、2400A/1800V 的系列产品。最近几年，出现了集 IGBT 与 GTO 二者

优势与一身的 IEGT 及 IGCT，其发展态势看好。同时，还出现了以 SSPIC、HVIC 等智能化的功率集成电路^[2]，它将全控制型电力电子器件与驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起，这种全新的智能时代还处在不断发展中。图 1.1 给出了主要功率半导体器件的发展概貌。

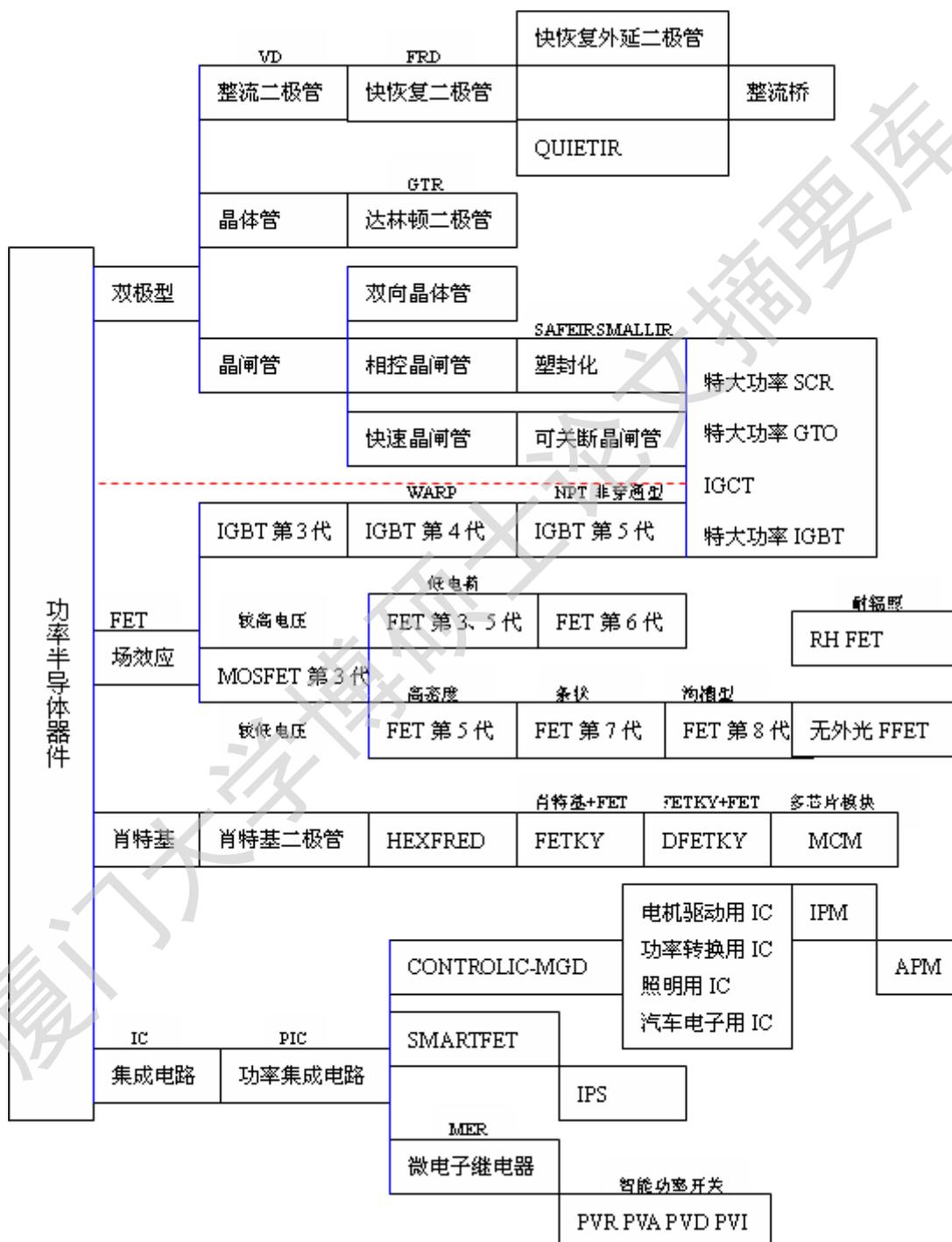


图 1.1 功率半导体器件概貌

总之，在功率半导体器件五十多年的发展历程中，制造技术不断提高，从晶

闸管靠换相电流过零关断的半控器件发展到 PID、SPIC 通过栅极或栅极控制脉冲可实现器件导通与关断的全控器件，从而实现了真正意义上的可控硅。从电流型控制模式发展到电压型控制模式，不仅大大降低了栅极的控制功率，而且大大提高了器件导通与关断的转换速度，从而使器件的工作频率由工频→中频→高频不断提高，目前正向着大容量、高频率、易驱动、低损耗、模块化、复合化方向发展。其中，IGBT 集 GTR 通态压降小、电流密度大、耐高压和 MOSFET 驱动功率小、开关速度快、输入阻抗高、热稳定性好等优点于一身，作为新型电力电子器件的代表，在中、高压应用领域中备受人们的青睐。

1.2 本课题的主要内容及意义

绝缘栅双极晶体管 1982 年底由美国研制成功，它的英文名称是 Insulated Gate Bipolar Transistor，缩写为 IGBT。还有一些其他名称，如：绝缘栅晶体管、绝缘门晶体管（Insulated Gate Transistor, IGT）、BI-MOS(Bioplant-mode MOSFET 或 Bipolar-MOS Transistor)、COMFET(Conductivity Modulated Field Effect Transistor)、BI-FET、GEMFET 等。IGBT 兼具 MOSFET 和 GTR 的多项优点，极大的扩展了半导体器件的功率应用领域。IGBT 的用途非常广泛，小到变频空调、静音冰箱、洗衣机、电磁炉、微波炉等家用电器，大到电力机车牵引系统都研制阶段^[3]。与国外相比，IGBT 的制造工艺技术至少落后十年，IGBT 的国产化形式相当紧迫。因此，开展 IGBT 的研发工作对我国国民经济和国防工业的发展具有十分重要的意义。

全球能源的日益紧缺让节能环保课题越来越成为人们关注的焦点，汽车、计算机、通信、消费电子、工业产品等都要求低功耗、高能效。在这种情形下，研制和开发更低功率损耗的 IGBT 仍然是国际上电力电子器件领域的一个热点课题。为了跟上当今 IGBT 研究步伐，本论文设计了一种具有较低功耗的新型结构的 IGBT 功率半导体器件，通过 SILVACO 公司的工艺仿真软件 ATHENA 对新型结构的 IGBT 进行了工艺设计，器件结构设计完成之后，再通过器件仿真软件 ATLAS 可以实现对 IGBT 器件性能的优化模拟，目标是完成高性能的 IGBT 功率半导体器件设计，并对其运行机理进行深入探讨。

本论文由以下六章内容构成：除本章外，第二章介绍了 IGBT 器件的结构及工作原理，包括分类、等效电路、静态工作特性、动态特性、门锁效应和安全工作区等；第三章简要介绍了本研究涉及到的半导体器件的工艺仿真和器件仿真的

相关理论知识；第四章给出了新型功率半导体器件 IGBT 的结构设计，并利用 SILVACO 模拟软件对其进行工艺模拟和器件性能优化设计；第五章通过参数提取，为所设计的 IGBT 器件建立了 SPICE 等效电路模型；第六章对本文工作进行了总结和展望。

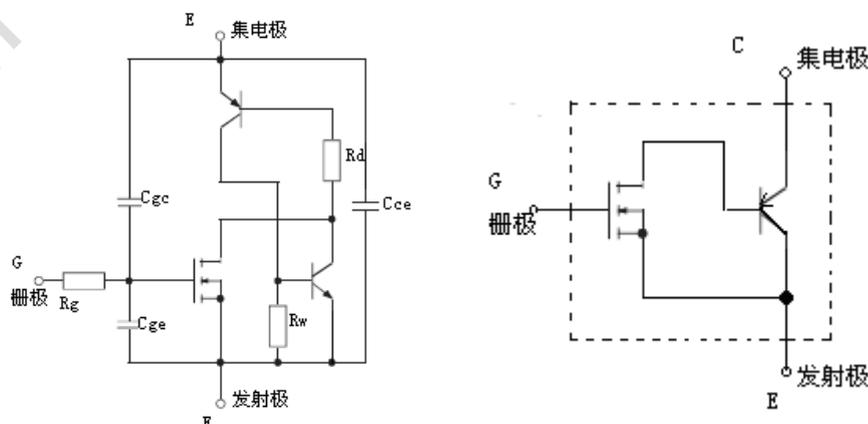
1.3 本章小结

本章简要介绍了功率半导体器件的发展历程，指出 IGBT 了在功率半导体器件家族中的优越性及市场潜力以及本课题研究的相关背景，并提出了本文的主要研究内容和重要意义。

表 2.1 IGBT 的寄生电容及电阻

符号	名称	产生和性质
C_{ge}	栅极-发射极电容	栅极和发射极的金属化部分的重叠引起的电容，取决于栅极-发射极电压，但与集电极-发射极电压无关
C_{ce}	集电极-发射极电容	N-base 区与 P 阱区之间的电容，取决于单元的面积、漏源击穿电压以及漏源电压
C_{gc}	栅极-集电极电容	米勒电容，由于栅极和 N-base 区之间的重叠而产生
R_g	栅极内阻	多晶硅栅极的电阻，在多芯片并联的模块中，常常还有附加的串联电阻以消弱芯片之间的振荡
R_d	N-base 区电阻	N-base 区的电阻（PNP 晶体管的基极电阻）
R_w	P 景区横向电阻	寄生 NPN 双极型晶体管的基极-发射极之间的电阻

从图 2.1 的 IGBT 剖面图中可以得到 IGBT 的等效电路模型，如图 2.2 所示。图 2.2(a) 所示的 IGBT 的等效电路中包含一只理想功率 MOSFET，以及一个寄生 NPN 晶体管：N⁺发射区（发射极）、P⁺阱区（基极）、N-base 区（集电极）。在这个寄生结构里，位于发射极之下的 P⁺阱区的电阻被视为基极-发射极电阻 R_w 。此外，下列区域组合构成了一个 PNP 晶体管：P⁺集电极区（发射极）、N-base 区（基极）、P⁺阱区（集电极）。这个 PNP 晶体管与上面的 NPN 晶体管一起构成了一个晶闸管结构。另外，两个相邻的 IGBT 单元之间还有一个寄生的 JFET 结构（图中未给出）。在 IGBT 正常工作时，要避免寄生 NPN 晶体管的导通，否则 IGBT 将失去栅控能力，发生闩锁效应。因此，等效电路中的寄生 NPN 管可以忽略，简化后的 IGBT 等效电路如图 2.2 (b) 所示，即 IGBT 可以看作是一个 N 沟道增强型 MOSFET 与一个 PNP 双极型晶体管的达林顿结构。



(a) IGBT 的等效电路 (b) 简化的 IGBT 等效电路

图 2.2 IGBT 的等效电路模型

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库