

学校编码: 10384
学号: 19820121152775

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

一种新型的 4H-SiC 雪崩光电二极管的光电特性
模拟

Modeling of the photoelectronic characteristics of a new
4H-SiC avalanche photodiode

钟 金 祥

指导教师姓名: 吴正云 教授
专 业 名 称: 凝聚态物理
论文提交日期: 2015 年 5 月
论文答辩时间: 2015 年 5 月
学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2015 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

2015年5月27日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- () 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
- () 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

2015年5月27日

摘要

紫外波段的光电探测器广泛应用于火箭发射、导弹跟踪、火焰探测、紫外通信以及紫外辐射测量等领域，具有很高的应用价值。采用 4H-SiC 半导体材料制备的紫外光电探测器具有低漏电流、高的量子效率、紫外可见抑制比高、抗辐射和耐高温等优点，是目前最具应用前景的紫外光电探测器。国内外多个课题组都对 4H-SiC 基紫外光电探测器进行了研究，成功制备出了多种结构的性能优越的 4H-SiC 紫外光电探测器，并在继续探索新结构的性能更优越的光电探测器。

本文基于传统的 PIN 结构和吸收-倍增-分离(SAM)结构的 4H-SiC 紫外光电二极管，设计了一种倍增区域较小而吸收区域较大的 4H-SiC 紫外雪崩光电二极管，可以有效的实现倍增层和吸收层分离的目的，本文称之为 APIN。应用 Silvaco ATLAS 半导体器件模拟软件模拟出了其光电特性，并对模拟结果进行了分析。

模拟结果表明 APIN 光电二极管的暗电流和击穿电压与倍增层宽度 D 有密切的关系，器件的暗电流随 D 的增大而增大，而击穿电压则随 D 的增大而减小， D 大于 $6\mu\text{m}$ 时击穿电压不再减小。通过分析器件内部的电场分布，发现引起击穿电压随 D 的增大而减小的原因是 P^+N^- 结的电场对倍增层底部的电场有着不同程度的影响，在倍增层底部形成不同高度的空穴势阱，从而造成的器件的击穿电压不同。分析发现倍增层宽度 D 为 $4\mu\text{m}$ 的 APIN 光电二极管有较好的性能，并对其光电特性作了详细的分析，发现有以下特点：1、相比于相同外延层结构和掺杂浓度的块状 SAM APD，具有更低的暗电流，反向偏压 100V 时为 $7.1 \times 10^{-13}\text{A}/\mu\text{m}$ ，比块状 SAM APD 小一个数量级；2、具有较低雪崩击穿电压(125V)，接近于 SAM APD 的击穿电压(116V)；3、在 124.95V 时其雪崩倍增因子达到 1.3×10^4 ；4、具有较高的量子效率，在单位倍增状态下，270nm 处的峰值外量子效率约为 63%，并且有较高的光谱响应(峰值响应度约为 0.14A/W)与紫外可见抑制比(>1000)。

关键词：4H-SiC；光电探测器；雪崩；紫外

Abstract

The detection of ultraviolet light has very high application value in many areas such as rocket launch, missile tracking, flame detection, ultraviolet communication and ultraviolet radiation measurement. The photodetector based 4H-SiC semiconductor materials is currently the most promising ultraviolet photodetector because of its advantages such as low leakage current, high quantum efficiency, high UV-visible rejection ratio, anti-radiation and high temperature resistance. Many research groups, both at home and abroad, have studied on the 4H-SiC-based photodetectors, and have successfully fabricated various structures of 4H-SiC UV photodetectors with superior performance, and continue to explore the new structures of 4H-SiC photodetectors with more superior performance.

Based on the traditional PIN structure and the separated absorption and multiplication (SAM) structure of 4H-SiC UV photodiodes, a new 4H-SiC UV photodiode with a small multiplication region and a large absorption region is designed and named as APIN in this thesis. The photoelectronic properties of the APIN photodiode are simulated by Silvaco ATLAS semiconductor device simulation software. And the simulation results are analyzed in detail.

Simulation results show that the dark current and the breakdown voltage of the APIN photodiode are closely dependent on the multiplication layer's width (D). While the D increase, the dark current increases, but the breakdown voltage (V_{br}) decreases, the V_{br} will not decrease when D is large than $6\mu\text{m}$. By analyzing the electric field inside the device, it is found that the reason of the breakdown voltage decreasing as the D increasing is the different height hole potential well which is caused by the different influence of the electric field inside the P^+N^- junction to that of the bottom of the multiplication layer. It is found that the APIN photodiode with $D=4\mu\text{m}$ has good performance, and its photoelectronic properties are analyzed in details, which is as following: 1) lower dark current which is $7.1 \times 10^{-13} \text{A}/\mu\text{m}$ at reverse bias 100V, an order of magnitude lower than that of SAM APD with same

epitaxial layer and doping, 2) a low avalanche breakdown voltage (125V), close to that of SAM APD(116V), 3) a avalanche multiplication factor up to 1.3×10^4 at reverse bias 124.95V, 4) high spectral response(peak responsivity $\sim 0.14\text{A/W}$), high UV-visible rejection ratio(>1000) and high quantum efficiency (about 63% at 270nm) .

Keywords: 4H-SiC; photodetector; avalanche; ultraviolet

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 紫外光电探测器综述.....	1
1.2 4H-SiC 紫外光电探测器的研究现状.....	3
1.3 Silvaco ATLAS 半导体器件模拟软件的介绍.....	5
1.3.1 ATLAS 模拟软件中的全面的物理模型.....	5
1.3.2 ATLAS 模拟软件中的先进的数值方法.....	6
1.3.3 ATLAS 模拟软件的输入与输出.....	6
1.4 本文的主要工作.....	7
第二章 4H-SiC 材料性质.....	8
2.1 4H-SiC 的晶体结构和材料生长.....	8
2.2 SiC 材料的掺杂.....	10
2.3 4H-SiC 材料的电学性质.....	10
2.3.1 4H-SiC 的能带结构.....	10
2.3.2 本征载流子浓度.....	11
2.3.3 载流子迁移率.....	12
2.3.4 碰撞离化系数与临界击穿电场.....	13
2.3 4H-SiC 材料的光学性质.....	14
第三章 4H-SiC 光电探测器的工作原理及参数特性.....	16
3.1 4H-SiC 光电探测器的基本结构及工作原理.....	16
3.1.1 金属-半导体-金属(MSM)光电探测器.....	16
3.1.2 PN 结光电探测器.....	16
3.1.3 PIN 光电探测器.....	17
3.1.4 雪崩光电探测器(APD).....	19
3.2 紫外光电探测器的主要参数特性.....	21
3.2.1 暗电流.....	21
3.2.2 光谱响应特性.....	23
3.2.3 量子效率及响应度.....	23

3.2.4 紫外可见抑制比.....	24
3.2.5 噪声等效功率和探测灵敏度.....	24
3.2.6 响应速度和频率特性.....	25
3.2.7 APD 的雪崩倍增因子.....	26
3.2.8 APD 的雪崩倍增噪声.....	27
第四章 4H-SiC APIN 光电二极管的结构设计和模拟程序.....	29
4.1 SAM 结构的雪崩光电二极管.....	29
4.2 4H-SiC APIN 光电二极管的结构设计.....	32
4.3 4H-SiC APIN 光电二极管的模拟程序.....	33
4.3.1 APIN 光电二极管结构的构建.....	33
4.3.2 APIN 光电二极管材料参数的设定.....	35
4.3.3 APIN 光电二极管物理模型的设定和计算方法的选择.....	36
4.3.4 APIN 光电二极管的模拟过程和结果的输出.....	37
第五章 4H-SiC APIN 光电二极管的模拟结果与分析.....	38
5.1 反向电流-电压特性与倍增层宽度 D 的关系.....	38
5.2 光谱响应与倍增层宽度 D 的关系.....	42
5.3 倍增层宽度为 $4\mu\text{m}$ 的 APIN 光电二极管的光电特性.....	45
5.3.1 反向电流-电压特性.....	46
5.3.2 正向电流-电压特性.....	47
5.3.3 光谱响应特性和量子效率.....	48
5.3.4 APIN 与 PIN 及 SAM APD 的光谱响应比较.....	50
5.4 本章小结.....	51
第六章 总结.....	53
参考文献.....	55
致谢.....	59

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Introduction of ultraviolet photodetector.....	1
1.2 Overview of 4H-SiC ultraviolet photodetector.....	3
1.3 Introduction of Silvaco ATLAS software.....	5
1.3.1 Comprehensive set of physic models in ATLAS	5
1.3.2 Sophisticated numerical algorithms in ATLAS.....	6
1.3.3 Datas' input and output in ATLAS	6
1.4 Works of this thesis	7
Chapter 2 4H-SiC material properties.....	8
2.1 4H-SiC crystal structure and material growth.....	8
2.2 Doping of SiC materials.....	10
2.3 Electrical properties of 4H-SiC.....	10
2.3.1 Energy band structure of 4H-SiC.....	10
2.3.2 Intrinsic carrier concentration	11
2.3.3 Carrier mobility.....	12
2.3.4 Impact ionization coefficient and critical breakdown field	13
2.3 Optical properties of 4H-SiC materials	14
Chapter 3 Operation principle and characristics of 4H-SiC photodetector	16
3.1 Basic structure and operation principle of 4H-SiC photodetector..	16
3.1.1 Metal-semiconductor-metal(MSM) photodetector	16
3.1.2 PN photodetector	16
3.1.3 PIN photodetector	17
3.1.4 Avalanche photodetector (APD)	19
3.2 Main parameters of ultraviolet photodetector	21
3.2.1 Dark current	21
3.2.2 Spectral response	23
3.2.3 Quantum efficiency and responsivity	23

3.2.4	Ultraviolet-visible rejection ratio	24
3.2.5	Noise equivalent power and detectivity	24
3.2.6	Response speed and frequency characteristics	25
3.2.7	Avalanche multiplication factor of APD	26
3.2.8	Avalanche multiplication noise of APD	27
Chapter 4	Structure design and simulation program of 4H-SiC APIN photodiode	29
4.1	SAM avalanche photodiode	29
4.2	Structure design of 4H-SiC APIN photodiode.....	32
4.3	Simulation program of 4H-SiC APIN photodiode	33
4.3.1	Modeling of APIN photodiode's structure	33
4.3.2	Material parameters of APIN photodiode	35
4.3.3	Physical models and numerical algorithms for APIN photodiode	36
4.3.4	Solution process and results output of APIN	37
Chapter 5	Simulation results and analysis of 4H-SiC APIN photodiode.....	38
5.1	reverse current-voltage characteristics rely on multiplication layer width (D).....	38
5.2	spectral response rely on multiplication layer width (D)	42
5.3	Photoelectronic characteristics of APIN photodiode with a multiplication layer width of 4μm.....	45
5.3.1	Reverse current-voltage characteristics	46
5.3.2	Forward current-voltage characteristics.....	47
5.3.3	Spectral response and quantum efficiency.....	48
5.3.4	Spectral response compares of APIN, PIN and SAM APD	50
5.4	Conclusion of this chapter	51
Chapter 6	Conclusion	53
Reference	55
Acknowledgements	59

第一章 绪论

1.1 紫外光电探测器综述

紫外波段的光辐射被广泛认为是波长范围在 10-400nm 的光辐射，日盲区的波段范围是 245-280nm。紫外波段的光辐射探测，特别是对日盲波段的探测，已经成为光电探测领域的重要研究对象。紫外光电探测器广泛应用于各个领域，在军事上可用于火箭发射、导弹预警、生化分析和飞行器制导等方面，在民用方面，可用于火焰探测、生物医药的分析、公安侦查以及紫外辐射测量等方面，因此其具有巨大的应用潜力，是光电探测领域的研究前沿之一^[1]。

外加滤波器的光电倍增管是使用历史悠久且最为广泛的紫外光电探测器^[2]，其具有增益高、响应速度快、噪声低、接收面积大以及产品成熟稳定等优点，但它具有工作电压高、体积大、笨重、易损坏以及制造成本高等缺点，限制了其应用范围。

半导体紫外光电探测器吸收紫外辐射而产生光电流，从而使紫外辐射被探测。与紫外光电倍增管相比，其具有结构简单、体积小、低成本、高稳定性以及无需制冷可在室温下工作等优点。因此，半导体基紫外光电探测器已经成为紫外光电探测领域的重要研究前沿。

制备半导体紫外光电探测器的半导体材料主要有 Si、GaN 基材料以及 SiC 材料^[3-5]。Si 材料具有最为成熟的材料和器件制备工艺，然而受限于其材料特性(如禁带宽度小，漏电流大)，器件的响应度不高以及需要昂贵的滤光元件。与硅材料不同，GaN 基材料和 SiC 是宽禁带半导体材料，对可见光不吸收，用他们制作的紫外探测器不需要滤光元件。GaN 基材料是直接带隙半导体材料，不仅广泛应用于发光器件上，而且用其制备的紫外探测器的响应波长很窄且光谱响应度很高，同时通过在 GaN 加入 Al 和 In 组分还可以调节其禁带宽度，制备出真正意义上的日盲波段紫外光电探测器。然而，由于其材料生长技术不够成熟，到目前还没有 GaN 衬底，在 Al₂O₃ 或 SiC 衬底上外延的 GaN 层有较多的缺陷^[6]，且用 GaN 基材料制备的探测器有较高漏电流，限制了其在紫外光电探测器上的应用。SiC 材料是间接带隙的宽禁带半导体材料，不适合制备发光器件，但是在

制备紫外光电探测器方面却更具优势。相比于 GaN 基材料, SiC 材料的生长质量更高且目前已有商业的 SiC 衬底, 而至今还没有 GaN 衬底, 采用 SiC 材料制备紫外光探测器可使光敏面积更大和成品率更高, 也更有利于商业化生产。同时, SiC 器件制备工艺与 Si 器件制备工艺兼容且 SiC 上可直接生长致密度很高的热氧化 SiO₂, 而 GaN 器件的制备工艺更复杂。SiC 是间接带隙半导体材料, 使得 SiC 紫外光探测器的紫外响应波长比 GaN 探测器的更宽。此外, SiC 材料的电子空穴离化系数比小于 0.1^[7], 远小于 GaN 材料的电子空穴离化系数比(约为 1)^[8], 因此, 采用 SiC 材料制备的紫外雪崩光电探测器将具有较高的探测灵敏度和较低的过剩噪声因子。

紫外半导体光电探测器的结构有很多种, 如图 1-1 所示^[9]。常用的结构有光电导结构、金属-半导体-金属(MSM)结构、肖特基势垒结构、PIN 光电二极管和雪崩光电二极管(APD)。前面三种结构都是平面型器件, 它们的有源区都在近表面, 所以对短波段的紫外辐射响应比较好, 然而它们存在漏电流大、灵敏度不够高等缺点。PIN 光电二极管是从 PN 光电二极管优化而来的, 在 p 型材料和 n 型材料中间增加了一层 I 层本征半导体材料, 增加了有源区的宽度, 更有利于光生载流子的吸收与分离, 从而提高了器件的量子效率, 并且其暗电流低、结电容较小以及响应速度快, 是目前紫外半导体光电探测器的主要结构形式。APD 工作在雪崩状态, 具有光电流放大效应(即倍增效应), 使其拥有响应度高、响应时间短和响应带宽大等特点, 广泛应用于难度较高的微弱光信号和单光子信号的探测, 是紫外辐射探测领域的长期关注热点。然而, APD 紫外辐射探测器具有雪崩倍增效应, 为了获得较小的雪崩噪声, 不仅材料的电子和空穴的离化系数比要很小, 而且器件的结构也要严格设计。此外, APD 通常工作在较高的反向偏压下, 对器件的边缘保护要求严格, 使得其制备工艺比其他结构更复杂。

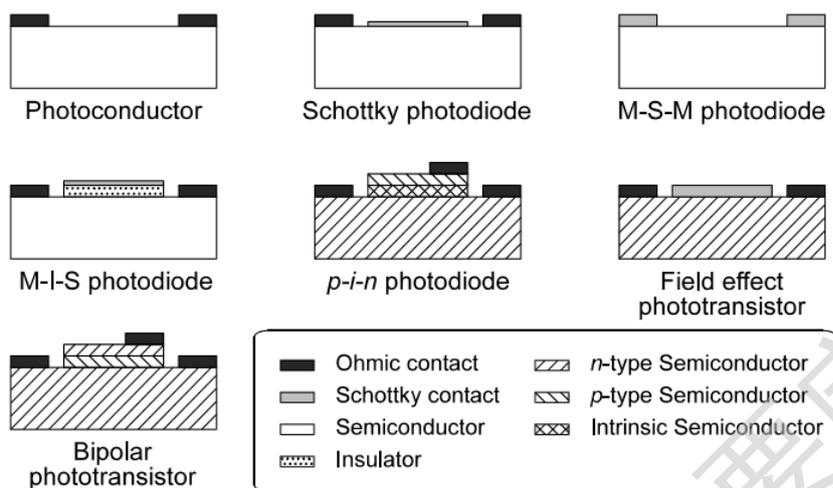


图 1-1 半导体紫外光电探测器的主要结构形式

1.2 4H-SiC 紫外光电探测器的研究现状

4H-SiC 材料具有带隙宽、临界击穿电场强度高、热导率高、饱和漂移速度快和抗辐射能力强等特点，是制备紫外辐射探测器的优选材料^[10]，采用 4H-SiC 材料制备的紫外光电探测器主要有以下特点：1、暗电流低，4H-SiC 的本征载流子浓度低，300K 时约为 10^{-8} cm^{-3} ，并且它间接带隙半导体，所以用其制备的器件有很低的暗电流；2、在日盲波段的响应度高，波长在 270-280nm 范围的光辐射在 4H-SiC 材料中的穿透深度约为 1-5 μm ，使有源区内有足够的光生载流子，因此响应度高；3、在可见光波段的响应度低，300K 时 4H-SiC 的禁带宽度是 3.23eV，对应的长波吸收限为 380nm，所以 4H-SiC 紫外探测器有很高的紫外可见抑制比；4、抗辐射和耐高温。

MSM 结构的光电器件属于平面结构器件，结构简单，制备容易，具有暗电流低、本征电容小以及工作频率高等特点。由于其有源区在近表面，短波段的光更容易到达有源区，因此 MSM 结构的光电探测器在短波段的响应度较高。多个课题组都曾报道过 4H-SiC MSM 紫外光电探测器，表明其具有较高的光谱响应度、较高的紫外可见抑制比和较好一致性。2012 年，Lien 等报道的 4H-SiC MSM 紫外光电探测器，在 450 $^{\circ}\text{C}$ 的温度时，依然有良好的灵敏度，表明器件的温度稳定性较好^[11]。本课题组先后制备出了单管和一维阵列的 MSM 结构 4H-SiC 紫外光电探测器^[12-13]，具有很低的暗电流(pA 量级)、较大的紫外可见抑制比($>10^3$)以

及较高的响应度(85~95mA/W)。

4H-SiC 肖特基光电探测器结构简单, 光敏面积大。美国 Rutgers 大学的 J. H. Zhao 课题组对 4H-SiC 肖特基势垒光电探测器作深入的研究, 在 2004-2006 年期间发表了多篇报道^[14-15], 取得了较好的结果, 器件在 4V 偏置电压下的暗电流小于 0.1pA, 器件工作在 0V 时, 在 230-295nm 光波长范围内, 其外量子效率都大于 50%, 在 275nm 光波长处约为 65%。2004-2005 年期间, 中国科技大学谢家纯课题组也发表了几篇文章, 他们制备出了性能良好的 4H-SiC 肖特基光电探测器并研究了器件的温度特性^[16], 在 10V 偏压下器件的暗电流约为 10pA, 在 260℃ 的温度下, 器件的反向暗电流很低且对紫外辐射有较高的响应度。

PIN 结构的 4H-SiC 紫外光电探测器具有暗电流低、响应度高、响应速度快以及无光内部增益等优点, 是目前使用最为广泛的紫外光电探测器之一。合理设计 I 层的厚度可达到调节峰值响应波长的目的。本课题组在 2007 制备出的 PIN 结构的 4H-SiC 紫外光电探测器具有很小的暗电流^[17], 在 20V 的反向偏压下仅有 0.5pA, 峰值响应光波长 270nm 处的响应度和量子效率分别约为 0.13A/W 和 61%, 紫外可见抑制比大于 10^3 。

APD 工作在雪崩电压下, 具有雪崩倍增效应, 同时具有高增益和高速度的特点, 主要应用于微弱信号或单光子信号的探测。4H-SiC 材料的电子和空穴的离化系数之比小于 0.1, 特别适合制备 APD 器件, 采用 4H-SiC 材料制备的 APD 具有较低的过剩噪声因子, 较高的探测率。1999 年, J. H. Zhao 课题组报道了第一个 4H-SiC APD^[18], 在反向偏压为击穿电压的 95% 时, 其暗电流在 nA 量级; 器件的最大光谱响应度为 106A/W。2003 年, 此研究小组成功制备了 40 单元的 4H-SiC APD 一维阵列^[19], 成品率达到 97.5%, 施加的反向电压为 126.5V 时, 单管的峰值响应波长为 260nm, 最大的光响应度约为 6×10^5 A/W, 紫外可见抑制比最大为 600, 表现出良好的性能。美国 Texas 大学的 J.C. Campbell 对 4H-SiC APD 作了大量的研究, 他们制备了 SAM 结构、PIN 结构、双台面侧壁结构和凹槽光窗结构等结构的 4H-SiC APD 探测器^[20-23], 在降低器件暗电流、提高探测性能等方面做出了大量的工作, 他们制备的 4H-SiC APD 可检测 fW 量级的微弱紫外辐射信号, 工作于单光子计数模式的 APD 的单光子检测率达到了 30%。本课题组在 2007 年制备出了低雪崩电压的 SAM 结构的 4H-SiC APD^[24], 器件的击穿电压

约为 55V，在施加的反向电压小于穿通电压的情况下其反向漏电流约为 10pA。反向偏压为击穿电压的 90%时，其雪崩倍增因子达到 1.8×10^4 。在反向偏压为 42V 时，其在峰值响应波长 270nm 处的响应度和外量子效率分别约为为 0.203A/W 和 93%，表现出明显的雪崩效应。

1.3 Silvaco ATLAS 半导体器件模拟软件的介绍

Silvaco ATLAS 器件仿真器是基于物理的模块化的易用的半导体器件模拟软件，它能精确的模拟出半导体器件的电学、光学和热学特性^[25-26]。ATLAS 可以模拟二维或三维半导体器件的直流、交流、时域响应以及光-电、电-光转换等特性。ATLAS 的功能很丰富，可以在 Deckbuild 交互式的运行环境中运行，允许 ATHENA、SSuprem3 器件工艺模拟器和 DevEdit 器件编辑器输入，UTMOST III 接口可以对器件的参数进行提取和对器件建模等。这种基于物理的器件模拟主要有如下优点：快速、节约并且可以提供实验过程中难以测量的信息。

1.3.1 ATLAS 模拟软件中的全面的物理模型

ATLAS 仿真软件中提供了非常全面系统的物理模型，其中包括：

- DC、AC 小信号和时效性信号的模型
- 漂移-扩散输运模型
- 能力平衡和流体动力学传输模型
- 晶格加热和热接触模型
- 缓变和突变异质结模型
- 在任意入射光条件下的光电相互作用模型
- 非晶硅和多晶硅材料模型
- 通用电路环境模型
- 受激发射与辐射模型
- 费米-狄拉克和波尔兹曼统计模型
- 先进的载流子迁移率模型
- 重掺杂效应的模型
- 受主和施主的陷阱动力学模型

- 欧姆接触、肖特基接触和绝缘接触的模型
- SRH 复合、辐射复合、俄歇复合和表面复合模型
- 局域或非局域的碰撞电离模型
- 浮栅电极模型
- 带间隧穿和 Fowler-Nordheim 隧穿模型
- 热载流子注入模型
- 热电子发射电流模型
- 量子输运模型

1.3.2 ATLAS 模拟软件中的先进的数值方法

ATLAS 模拟软件中提供了非常先进的数值计算方法，以得到更精确的模拟结果，其中包括：

- 准确和强大的离散化技术
- Gummel、Newton 和 Block-Newton 非线性迭代算法
- 对线性子问题的有效求解算法，包括直接算法和迭代算法
- 强大的初始计算点猜测技术
- 小信号计算技术，包括所有的频率
- 稳定和精确的时间积分算法

1.3.3 ATLAS 模拟软件的输入与输出

图 1-2 给出了 ATLAS 模拟软件的输入与输出类型^[26]。ATLAS 模拟软件的输入方式有两种：一种是在 Deckbuild 交互式的运行环境中直接输入命令，由 ATLAS 软件直接执行；另一种是由 ATHENA 器件工艺模拟器或 DevEdit 器件编辑器定义的结构并保存的结构文件，再用 ATLAS 软件中的命令调用其文件，实现文件的输入。

ATLAS 模拟软件的数据输出方式有三种：第一种是运行时的实时输出，这种输出方式提供了每一句语句执行时的信息，包括错误和警告信息，可以直接在 Deckbuild 的信息栏中查看；第二种输出方式是保存的日志文件，主要有结构文件和 log 文件。log 文件存储了器件模拟过程中产生的器件终端电压和电流信息，还有 probe 或在 log 状态设置时声明的物理量；第三种输出方式是保存的 solution

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.