|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 二维场效应晶体管的准费米能级相空间模型及其实验验证 | | | | | | |
| (申请清华大学工学博士学位论文) | | | | | | |
|  | | | | | | |
| 培养单位 | ： | 集成电路学院 | | |
| 学科 | ： | 电子科学与技术 | | |
| 研究生 | ： | 鄢 诏 译 | |
| 指导教师 | ： | 任 天 令 | 教 授 |
|  |  |  |  |
|  | | | | | | |
| 二○二三年三月 | | | | | | |

|  |
| --- |
| 二维场效应晶体管的准费米能级相空间模型及其实验验证 |
| 鄢 |
| 诏 |
| 译 |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Quasi-Fermi-Level Phase Space Model and its Experiment Verification for Two-Dimensional Field-Effect Transistor** | | |
| Dissertation submitted to  **Tsinghua University**  in partial fulfillment of the requirement  for the degree of  **Doctor of Philosophy** | | |
| in  **Electronics Science and Technology** | | |
| by  **Zhao-Yi Yan** | | |
| Dissertation Supervisor | : | Professor Tian-Ling Ren |
|  |  |  |
|  | | |
| **March, 2023** | | |

学位论文公开评阅人和答辩委员会名单

公开评阅人名单

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 刘XX | 教授 | 清华大学 |
| 陈XX | 副教授 | XXXX大学 |
| 杨XX | 研究员 | 中国XXXX科学院XXXXXXX研究所 |

答辩委员会名单

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 主席 | 赵XX | 教授 | 清华大学 |
| 委员 | 刘XX | 教授 | 清华大学 |
|  | 杨XX | 研究员 | 中国XXXX科学院XXXXXXX研究所 |
|  | 黄XX | 教授 | XXXX大学 |
|  | 周XX | 副教授 | XXXX大学 |
| 秘书 | 吴XX | 助理研究员 | 清华大学 |

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》及上级教育主管部门具体要求，向国家图书馆报送相应的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 作者签名： | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | 导师签名： | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |
| 日 期： | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |  | 日 期： | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ |

# 摘 要

# Abstract

# 目 录

[摘 要 I](#_Toc129657253)

[Abstract II](#_Toc129657254)

[目 录 III](#_Toc129657255)

[插图和附表清单 V](#_Toc129657256)

[符号和缩略语说明 VI](#_Toc129657257)

[第1章 A级标题 1](#_Toc129657258)

[1.1 B级标题 1](#_Toc129657259)

[1.1.1 C级标题 1](#_Toc129657260)

[1.1.2 C级标题 2](#_Toc129657261)

[1.2 B级标题 3](#_Toc129657262)

[1.2.1 C级标题 3](#_Toc129657263)

[1.2.2 C级标题 3](#_Toc129657264)

[第2章 A级标题 4](#_Toc129657265)

[2.1 B级标题 4](#_Toc129657266)

[2.1.1 C级标题 4](#_Toc129657267)

[第3章 A级标题 5](#_Toc129657268)

[3.1 B级标题 5](#_Toc129657269)

[3.1.1 C级标题 5](#_Toc129657270)

[第4章 A级标题 7](#_Toc129657271)

[4.1 B级标题 7](#_Toc129657272)

[4.1.1 C级标题 7](#_Toc129657273)

[参考文献 9](#_Toc129657274)

[附录A 附录标题1 10](#_Toc129657275)

[附录B 附录标题1 11](#_Toc129657276)

[附录C 附录标题1 12](#_Toc129657277)

[附录D 附录标题1 12](#_Toc129657278)

[附录E 附录标题1 12](#_Toc129657279)

# 插图和附表清单

# 符号和缩略语说明

# A级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

## B级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容



图 1.1 双极型场效应晶体管漏源电流的分解

如图 1.1所示，一些非常厉害的内容。

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

表 1.1 漂移-扩散理论和QFLPS方法对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 方法 | 输运方程 | 载流子密度场 | 准费米能级路径 | 备注 |
| 漂移-扩散理论 | 式- | 式- |  | 需要自洽解漂移扩散方程 |
| QFLPS方法 | 式 | 式- | 式 | 满足零旋度条件即可 |

如表 1.1所示，一些非常厉害的内容。

表 1.2 漂移-扩散理论和QFLPS方法对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 方法 | 输运方程 | 载流子密度场 | 准费米能级路径 | 备注 |
| 漂移-扩散理论 | 式- | 式- |  | 需要自洽解漂移扩散方程 |
| QFLPS方法 | 式 | 式- | 式 | 满足零旋度条件即可 |

如表 1.1所示，一些非常厉害的内容。

## B级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

# A级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

## B级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

# A级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

## B级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

表 3.1 漂移-扩散理论和QFLPS方法对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 方法 | 输运方程 | 载流子密度场 | 准费米能级路径 | 备注 |
| 漂移-扩散理论 | 式- | 式- |  | 需要自洽解漂移扩散方程 |
| QFLPS方法 | 式 | 式- | 式 | 满足零旋度条件即可 |

如表 1.1所示，一些非常厉害的内容。

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

# A级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

## B级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

表 3.1 漂移-扩散理论和QFLPS方法对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 方法 | 输运方程 | 载流子密度场 | 准费米能级路径 | 备注 |
| 漂移-扩散理论 | 式- | 式- |  | 需要自洽解漂移扩散方程 |
| QFLPS方法 | 式 | 式- | 式 | 满足零旋度条件即可 |

如表 1.1所示，一些非常厉害的内容。

### C级标题

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

# 参考文献

# 附录标题1

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容



图 A.1 双极型场效应晶体管漏源电流的分解

如图 A.1所示，一些非常厉害的内容。

# 附录标题1

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

# 附录标题1

一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容一些非常厉害的内容

# 附录标题1

# 附录标题1

# 致 谢

# 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： 日 期：

# 个人简历、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

197×年××月××日出生于四川××县。

1992年9月考入××大学化学系××化学专业，1996年7月本科毕业并获得理学学士学位。

1996年9月免试进入清华大学化学系攻读××化学博士至今。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文：

1. Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films[J]. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235.
2. 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291.
3. 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193.
4. Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press[J]. (已被Integrated Ferroelectrics录用)

**专利：**

1. 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A[P]. 2005-03-30.
2. Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102[P]. (美国发明专利申请号.)

# 指导教师评语

# 答辩委员会决议书