

专业仿真软件在半导体器件物理课程改革中的应用*

李亚平 李晓军

(河南工业大学理学院 河南 郑州 450001)

(收稿日期:2023-01-28)

摘要:半导体器件物理及其相关课程已成为应用物理学专业和电子信息类专业高年级本科生和研究生的必修课程.课程教学内容是从事半导体器件设计、制造和应用等方面工作和研究所必需的专业知识.此课程在建设教学-研究型大学的学生培养课程设计中具有代表性作用.本文选取本课程的部分重难点为实例采用 Silvaco 软件进行仿真,得到的仿真结果与教材给出的结论一致性非常高,说明此专业仿真软件 Silvaco 可用于课程教学中.将专业仿真软件与课程相结合,不仅可以更形象地解释物理参数,提高教师授课效果,更能使学生通过理论与应用的联系,明确学习的目的,提高学习兴趣,加强对专业知识的重视.

关键词:半导体器件;课程改革;器件仿真;MOSFET

半导体器件物理课程的主要任务是为学生学习专业知识和从事电子技术工作打好理论基础.课程包含大量的物理模型和多种典型的半导体器件原理.一方面,学生们清楚该课程的重要性,以及学好本课程给他们日后深造或就业能够带来的重大帮助;另一方面,面对教材中大量的专业物理量和复杂的计算公式,概念多且抽象,很多物理现象较难理解,学生们又对课程内容学习的艰深心存顾虑,缺乏信心.

纯理论教学过程容易导致学生被动地机械记忆书本内容,而不能透彻理解公式和实验方法背后的物理现象,不利于学生真正掌握课程的要点,使课程变得枯燥乏味,降低学生学习的兴趣.

在教学过程中需将重点放到数理基础与器件应用关联上,通过将复杂的公式推导过程利用计算机计算,将物理概念与图形化的现象联系起来,不仅能够有效培养学生学习课程的兴趣,提高学生对问题的思维水平和创新能力,更能增加学生的技能,增强学生在未来工作和接受继续教育时的竞争力.由于

实际器件制造设备和测试的成本非常昂贵,难以在普通本科教学中达到实际器件制造和测试的环境.因此,多采用仿真软件的方式帮助学生学习半导体器件的相关原理.尽管 Matlab 等软件已经引入到本课程的教学用于仿真器件特性^[1-2],也在一定程度上降低了教学难度,但这些非专业的半导体软件带来的编程困难,仍然使学生望而却步.

Silvaco TCAD 软件是由 Silvaco 公司研发的一款辅助设计工具.软件易学易用,可以快速入门,对本科生来说学习和使用并不困难.此软件运算速度快,具有丰富的拓展功能,通过在软件中设定相应的工艺和器件参数,可以模拟实现器件制造的全流程,也可以对器件的性能进行仿真验证分析,提取相关参数,是目前半导体工业和器件领域的主要商用软件之一.目前已有教师提出将专业仿真软件应用到教学中来^[3-4],本文将结合实际案例展示 Silvaco 仿真软件对教材内容的形象化展示,并研制了软件辅助教学的教学计划.

* 河南工业大学理学院本科教学研究类项目,项目编号:lxjy202217,20200002.

作者简介:李亚平(1989-),女,博士,讲师,主要研究方向为功能材料与器件的制备和光电性能调控.

1 专业仿真软件 Silvaco TCAD在本课程中的应用

1.1 Silvaco TCAD 的主要模块

Silvaco TCAD 仿真界面操作简单,适合本科生

学习和使用,其工作模块主要包含工艺仿真器、器件仿真器及交互式工具,可以实现从半导体器件的制造到其电学、光学和热学特性研究的全过程仿真,各模块的具体功能与相互关联如图1所示。

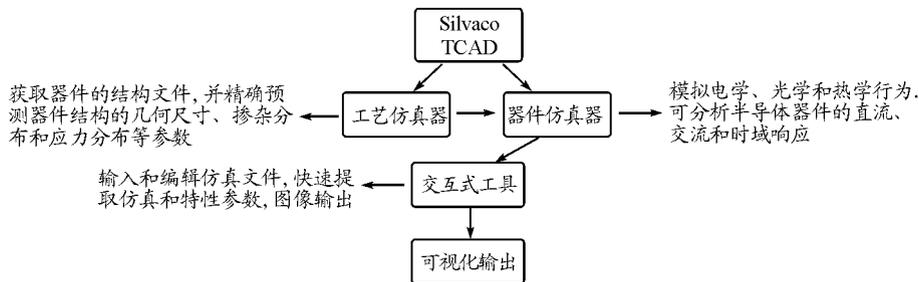


图1 Silvaco 主要模块功能和仿真流程图

1.2 仿真实例案例分析

以下将参考本校半导体器件物理课程教学大纲的重点与难点部分展示以课程内容为基础,借助 Silvaco TCAD 软件,将物理图像展示出来,并与教材^[5-6]相对比,分析软件在教学过程中的适用性和灵活性。

压下的能带图.通过调节P区和N区的掺杂浓度,学生可以从输出图像中发现导带和价带与费米能级的关系变化,从而加深对教材中的掺杂浓度与能级关系公式(1)的理解

$$E_F = E_c + kT \ln \frac{N_D}{N_c} \quad (1)$$

1.2.1 PN结的能带结构和开关特性

大多数半导体器件都包含至少一个PN结,PN结的物理知识是理解半导体器件工作原理的基础,因此深入理解PN结的特性至关重要。

能带图是理解半导体器件工作原理的基础,图2中(a)、(b)、(c)分别为一简单构建的Si PN结在从仿真软件输出的结果与教材中的结果图2(d)、(e)、(f)一致性保持的非常好,与此同时,学生还可以调节正反向电压的大小来观察外加电压与能带变化的关系。

图2对比了 Silvaco TCAD 软件仿真结果和教材中给出的PN结在平衡状态、正向电压和反向电压

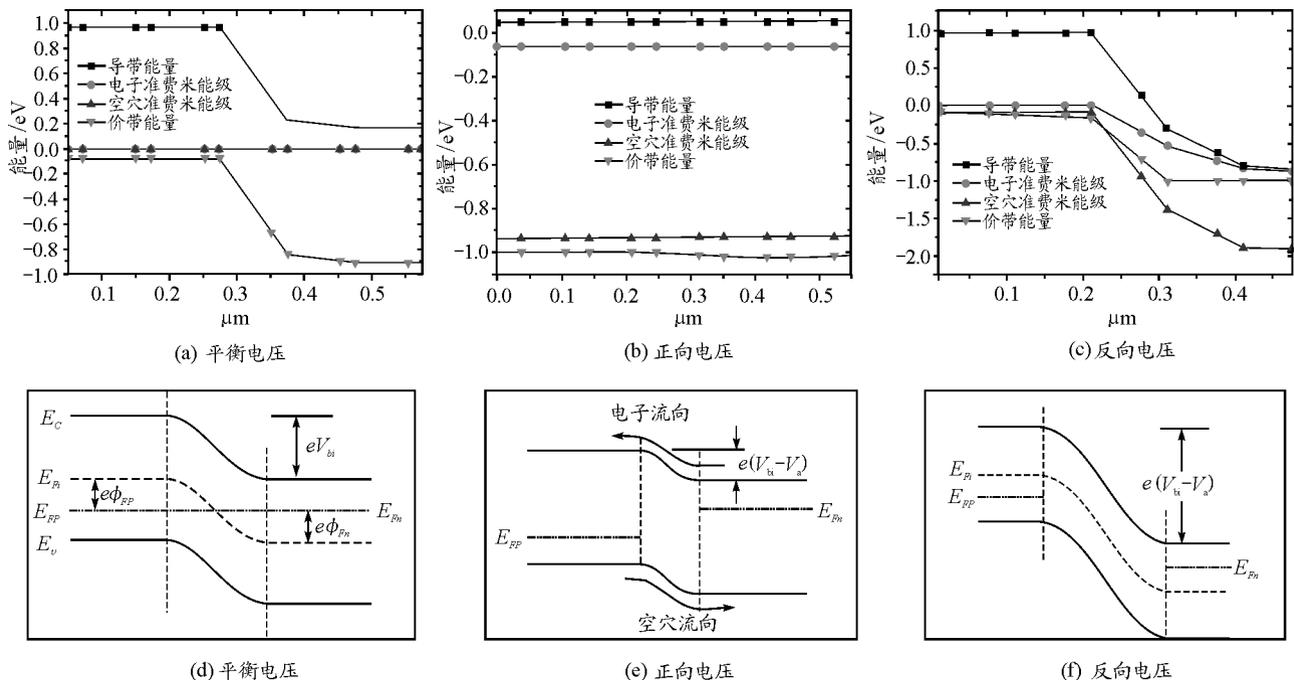


图2 (a)~(c)为 Silvaco 软件对PN结在平衡电压、正向电压和反向电压下仿真得到的能带图;

(d)~(f)为教材中给出的PN结在平衡电压、正向电压和反向电压下的能带图

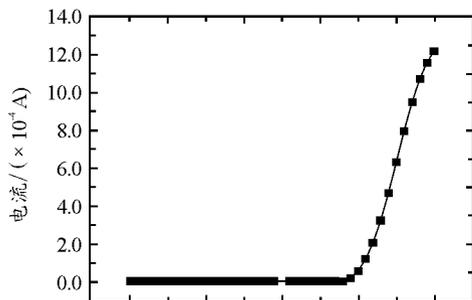
本文基于本课程教学的重点内容以PN结二极管、双极型晶体管和N-MOSFET管为例对比了仿真出的电学特性和教材中给出的示例。

1.2.2 PN结二极管的器件仿真

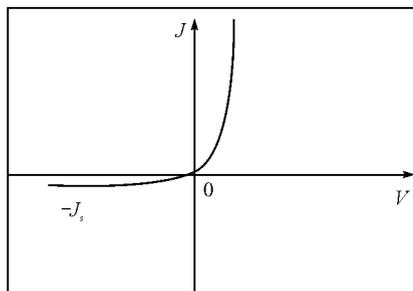
PN结二极管的电流值符合以下公式

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

PN结二极管的 $I-V$ 曲线仿真结果图3(a)显示出单向导电性,和教材^[5]中给出的结果图3(b)一致性非常好。



(a) Silvaco仿真结果



(b)教材中给出的结果

图3 Si基二极管 $I-V$ 特性曲线

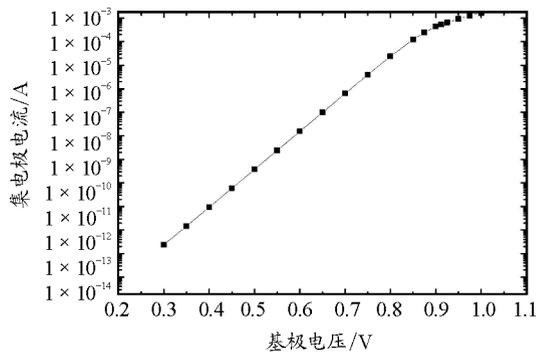
1.2.3 双极型晶体管特性分析

双极型晶体管是两种主要类型的晶体管之一,因其高电流增益广泛应用于模拟电子电路中,也是本课程教学的重点内容之一.本文借助Silvaco中器件模拟模块,仿真输出Gummel曲线及 I_C 、 V_{CE} 特性曲线,并调整相关参数,观察并分析各关键参数对晶体管性能的影响。

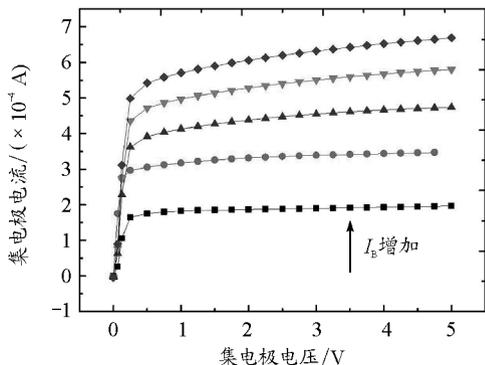
在共射极电路中,集电极电流 I_C 与基极电压存在如下关系式

$$I_C \propto \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \quad (3)$$

得到Gummel曲线的仿真结果如图4(a)所示.其输出特性曲线如图4(b)所示, I_C 随 I_B 等间距分布,此仿真结果与教材中^[6]给出的结果一致.可见,Silvaco仿真软件可以对双极型晶体管器件性能进行有效仿真,学生可以调节各端电压观察曲线的变化,进一步理解各参量之间的关联。



(a) Gummel曲线



(b)输出特性曲线

图4 NPN-BJT仿真结果

1.2.4 MOSFET直流参数与其结构之间的关系

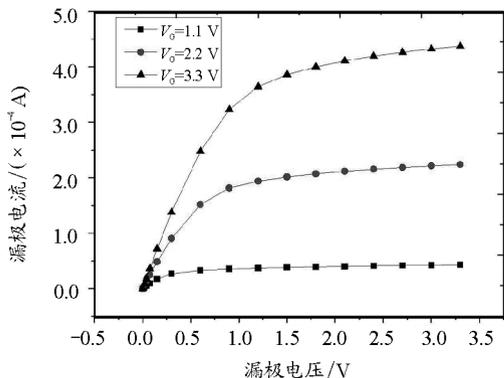
MOSFET工作原理的理解是本课程的重点内容之一,同时直流参数与结构之间的关系也是一个难点,针对此部分,我们以N-MOSFET为例,借助此仿真软件输出输出特性曲线和转移特性曲线。

其电流和栅极电压 V_{GS} 、漏端电压 V_{DS} 之间符合公式(4),直到沟道层发生夹断时达到饱和。

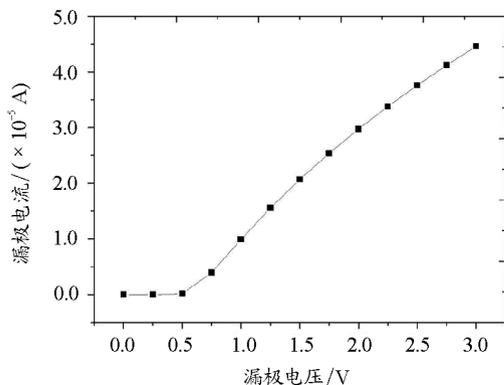
$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (4)$$

当 $V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$ 时, I_D 与 V_{DS} 呈线性关系,表现为线性区;当 $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ 时,电流达到饱和,不再随着 V_{DS} 的增大而变化,只与 V_{GS} 相关,如图5(a)所示.达到饱和以后, I_D 正比于 $(V_{GS} - V_T)^2$,即

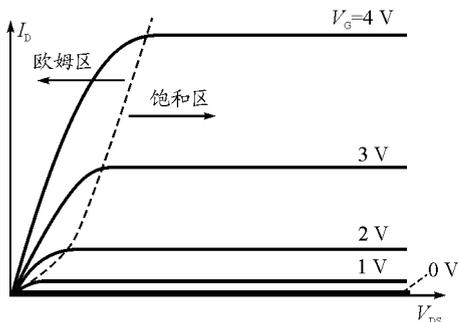
对应转移特性曲线,如图5(b)所示。



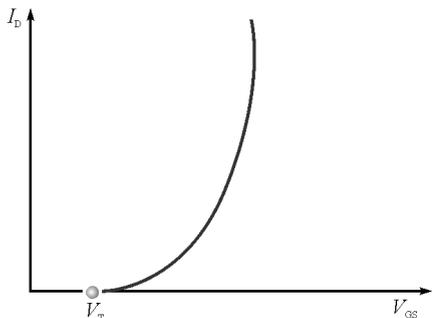
(a) N-MOSFET结构仿真输出特性曲线簇



(b) N-MOSFET结构仿真输出转移特性曲线



(c) 教材中给出的N-MOSFET对应的输出特性曲线簇



(d) 教材中给出的N-MOSFET对应的转移特性曲线

图5 N-MOSFET仿真结果与教材中给出的结果图

通过对多个基础的典型器件结构的仿真结果和教材中给出的图像比较,可以看出仿真软件可以较好的以图形的方式反映出各参量之间的关系,学生在调节参量值的过程中能够更深刻地理解每个量的物理含义及对器件性能的作用。

2 课程改革的实际操作方法——课程教学方式和考核方式的改革

2.1 教学方式改革

在传统教学模式中,教师按照一定顺序以教师讲授为主完成教学大纲要求的教学任务.这种教学模式的优点在于可以将教学大纲要求的知识全面地教授给学生,缺点则更显而易见,就是学生对知识的吸收非常有限.即使在各种奖励机制的鼓励下,也很少有学生乐于主动参与课堂活动,很难形成教师与学生的互联.在课程改革中,我们将原有理论学时压缩,加入器件仿真学习.以学生自由组合方式,建立讨论小组,在一个知识单元学习前,小组调研所学内容应用的电子元器件有哪些,提取出重点参数,在课堂中能将自己提取的参数与教材中的内容相对应,并理解其在电子元件工作中的作用,课后再利用仿真软件对相应元件的性能进行仿真.教学方式由传统的教师讲授为主,转变为以学生为中心,学生主动挖掘知识,主动建立知识与应用的联系,并立即应用的教学方式,此教学方式的转变可将知识吸收比例由被动接受时的5%提高到主动学习的90%.在获取专业知识的同时,学生也拓宽了视野,其探索精神和创新思维都得到了有效提升。

2.2 考核方式改革

针对我们制定的教学目标,采用“线上+线下”混合教学模式,课程考核包含平时成绩和期末成绩两部分.平时成绩由课前调研,课堂小组讨论发言,课后仿真练习组成;期末成绩则由期末考试和研究论文构成,其中考试部分可对学生知识掌握程度做出考核,而研究论文部分则重点在知识内容的应用上.通过多维度的考核方式,对学生的学习能力、知

识迁移能力和解决问题的能力等进行了全方位的考核,既能有效给出学生的学习情况,又能培养学生的科研能力.

3 总结

Silvaco 仿真软件具有简单易学,适用范围广泛,与半导体物理基础知识,半导体器件结构设计和性能表现密切联系,本文以半导体器件物理课程重难点为案例,展示了专业仿真软件与课程教学相融合的适用性.在未来的教学中,将专业半导体器件仿真软件引入到课程教学中,学生不但可以仿真上课学到的相关器件的光学、电学和热学特性,深入理解所学习的重难点知识,还可以尝试探索仿真一些基于课本基础知识发展而来的一些前沿器件的性能.这样不仅能够增加课程学习效果,通过调研和查找

最新研究进展更能培养学生的发散性思维,协同促进学生的专业知识和科研能力的提升,为学生未来的工作或研究打下基础.

参考文献

- [1] 许明坤. MATLAB 在半导体物理教学中的应用[J]. 巢湖学院学报, 2013, 15(3): 156 - 158.
- [2] (美) Pierret Robertf. 半导体器件基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [3] 丛嘉伟, 周志强, 佟艳群, 等. Silvaco 软件在《半导体器件》教学实践中的应用[J]. 才智, 2016(15): 93.
- [4] 唐莹, 李万清. L-EDIT 软件在“半导体器件”教学中的应用[J]. 电气电子教学学报, 2010, 32(6): 108 - 109, 112.
- [5] (美) Neamen Donald. 半导体物理与器件[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [6] (美) 施敏, (美) 李明逵. 半导体器件物理与工艺[M]. 3 版. 苏州: 苏州大学出版社, 2014.

Application on Professional Simulation Software in the Curriculum Reform of Semiconductor Devices

LI Yaping LI Xiaojun

(School of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001)

Abstract: Semiconductor device physics and its related courses have become a compulsory course for senior undergraduates and researchers of applied physics and electronic information majors. This course is designed to provide the professional knowledge for the design, manufacture and application of semiconductor devices. This course plays a representative role in the design of student training courses in the construction of teaching-research universities. A part of the important and difficult points of this course have been choose as silvaco simulation examples. The obtained simulation results are consistent with the conclusions given in the textbook, which shows that this professional simulation software can be used in the teaching of the course. Combining the professional simulation software with the course can not only explain the physical parameters more vividly and improve the teaching effect of teachers, but also make students clear the purpose of learning, improve their interest in learning and strengthen their attention to professional knowledge through the connection between theory and application.

Key words: semiconductor devices; curriculum reform; device simulation; MOSFET