

2017 年度示范性虚拟仿真实验教学项目申报表

学 校 名 称	西安电子科技大学
实 验 教 学 项 目 名 称	氮化镓发光二极管工艺制造与 光电特性虚拟仿真实验
所 属 课 程 名 称	半导体工艺和器件物理
所 属 专 业 代 码	080704
实验教学项目负责人姓名	张玉明
实验教学项目负责人电话	13152110939 (手机)
有 效 链 接 网 址	http://icdm.xidian.edu.cn/

教育部高等教育司 制

二〇一七年九月

填写说明和要求

1. 以 Word 文档格式，如实填写各项。
2. 表格文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。
3. 所属专业代码，依据《普通高等学校本科专业目录（2012 年）》填写 6 位代码。
4. 涉密内容不填写，有可能涉密和不宜大范围公开的内容，请特别说明。
5. 表格各栏目可根据内容进行调整。

1. 实验教学项目教学服务团队情况

1-1 实验教学项目负责人情况																													
姓名	张玉明	性别	男	出生年月	1965.05																								
学历	研究生	学位	工学博士	电话	029-88201930																								
专业技术职务	教授、博导	行政职务	微电子学院院长	手机	13152110939																								
院系	微电子学院		电子邮箱	zhangym@xidian.edu.cn																									
地址	陕西省西安市雁塔区太白南路 2 号 西安电子科技大学微电子学院			邮编	710071																								
教学研究情况：主持的教学研究课题（含课题名称、来源、年限，不超过 5 项）；作为第一署名人在国内外公开发行的刊物上发表的教学研究论文（含题目、刊物名称、时间，不超过 10 项）；获得的教学表彰/奖励（不超过 5 项）。 1.主持或参加的教学研究课题 <table border="1"> <thead> <tr> <th>序号</th> <th>课题名称</th> <th>来源</th> <th>年限</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>首批国家示范性微电子学院建设单位</td> <td>教育部、发改委等六部委</td> <td>2015-2018</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>集成电路实验教学示范中心</td> <td>国家教育部</td> <td>2009-2012</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>专业综合改革试点</td> <td>陕西省教育厅</td> <td>2014-2017</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>半导体器件物理-陕西省普通高校精品资源共享课程</td> <td>陕西省教育厅</td> <td>2014-2017</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>以示范性微电子学院建设为契机，探索创新人才培养和个性化教育机制</td> <td>陕西省教育厅</td> <td>2015-2018</td> </tr> </tbody> </table>						序号	课题名称	来源	年限	1	首批国家示范性微电子学院建设单位	教育部、发改委等六部委	2015-2018	2	集成电路实验教学示范中心	国家教育部	2009-2012	3	专业综合改革试点	陕西省教育厅	2014-2017	4	半导体器件物理-陕西省普通高校精品资源共享课程	陕西省教育厅	2014-2017	5	以示范性微电子学院建设为契机，探索创新人才培养和个性化教育机制	陕西省教育厅	2015-2018
序号	课题名称	来源	年限																										
1	首批国家示范性微电子学院建设单位	教育部、发改委等六部委	2015-2018																										
2	集成电路实验教学示范中心	国家教育部	2009-2012																										
3	专业综合改革试点	陕西省教育厅	2014-2017																										
4	半导体器件物理-陕西省普通高校精品资源共享课程	陕西省教育厅	2014-2017																										
5	以示范性微电子学院建设为契机，探索创新人才培养和个性化教育机制	陕西省教育厅	2015-2018																										

2. 获得的教学表彰/奖励

序号	成果名称	评奖单位、时间	获奖等级	第几完成人
1	教学与科研、工程相融合的微电子本科人才培养改革与实践	2015 年 陕西省	特等	第 6
2	面向国家急需，建设我国集成电路紧缺人才培养体系的十年探索与实践	教育部、2014	二等	第 20
3	高校内部教学质量监控长效机制探索与实践	2014 年 西安电子科技大学教学成果	一等	第 7
4	建设国家集成电路人才培养基地的探索与实践	陕西省、2012	二等	第 2

学术研究情况：近五年来承担的学术研究课题（含课题名称、来源、年限、本人所起作用，不超过 5 项）；在国内外公开发行人刊物上发表的学术论文（含题目、刊物名称、署名次序与时间，不超过 5 项）；获得的学术研究表彰/奖励（含奖项名称、授予单位、署名次序、时间，不超过 5 项）。

1. 承担的学术研究课题

序号	课题名称	来源	经费（万元）	起止日期
1	兆瓦级 xxx 关键技术研究 /90608110009	教育部重点	2000	2012-2016
2	晶圆级石墨烯电子材料与器件研究/90202110002	02 重大专项	551.3	2011-2016
3	4 英寸 xxx 技术研究 /90405110054	预研项目	192	2011-2015
4	日盲 xxx 材料研制 /90506160001	科工局项目	780	2015-2017
5	用于xxx探测的关键材料和技术研究	科工局项目	1200	2016-2017

2. 发表的学术论文

论文题目	刊物名称, 发表时间, 卷(期)号	作者
Preparation of few-layer graphene on on-axis 4H-SiC (000 1) substrates using a modified SiC-stacked method”,	Materials Letters, Vol.164, No.2, February 1, 2016, pp. 655-658, EI: 20154901633924, SCI: WOS:000367115600163	Hu, Yanfei; Zhang, Yuming;
Growth of thickness-controlled epitaxial graphene on on-axis 6H-SiC (C-face) substrate in graphite enclosure	Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 27, No.6, June 2016, pp 6242-6248, SCI: WOS:000377898000101	Hu, Yanfei; Zhang, Yuming;
Kinetic mechanism of V-shaped twinning in 3C/4H-SiC heteroepitaxy	Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, Vol. 34, No.3, 2016, p. 4947601, SCI: WOS:000379792200005	Xin, Bin; Zhang, Yu-Ming
An Improved ICP Etching for Mesa-Terminated 4H-SiC p-i-n Diodes	IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. 62, NO. 4, APRIL 2015, pp.1223~1229, SCI: WOS:000351753900022	Han, Chao; Zhang, Yuming; Song, Qingwen
Improvement of current gain and breakdown voltage in 4H-SiC BJTs employing high-k dielectric as an interfacial layer	Materials Science Forum Vols 821-823 (2015) pp 818-821	Lei Yuan, Yuming Zhang

3. 获得的学术研究表彰/奖励

序号	奖项名称	授予单位	署名次序	时间
1	ECR 可刻蚀及碳化硅高温半导体器件技术	陕西省科学技术进步二等	5	2003
2	碳化硅高温半导体器件技术	陕西高等学校科学技术二等奖	1	2002
3	碳化硅器件及其相关技术的研究	陕西省信息产业厅科技成果一等奖	1	2001
4	HEMT 计算机模拟研究,	电子工业部科技进步奖三等奖	2	1997
5	模拟软件在三维半导体器件模拟的应用研究	电子工业部科技进步奖三等奖	2	1994

1-2 实验教学项目教学服务团队情况						
序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	张玉明	微电子学院	教授、博导 校级教学名师	院长	项目规划	
2	马佩军	微电子学院	副教授、硕导	副主任	项目管理	
3	张进成	微电子学院	教授、博导	副院长	项目管理	
4	毛维	微电子学院	副教授、博导	无	项目实施 技术支持	
5	史江一	微电子学院	副教授、硕导	无	项目实施 技术支持	
6	郑雪峰	微电子学院	教授、博导	无	项目实施	
7	张春福	微电子学院	教授、博导	无	项目实施	
8	汤晓燕	微电子学院	教授、博导	无	项目实施	
9	樊永祥	微电子学院	讲师	无	在线教学 服务	
10	周小伟	先进材料与纳米科技学院	讲师	无	项目实施 技术支持	
11	李隐峰	电子工程学院	副教授、硕导	网络信息中心主任	在线教学 服务、技术支持	
12	常志强	Silvaco, Inc.	高工	技术经理	软件技 术支持	

注：1. 教学服务团队成员所在单位需如实填写，可与负责人不在同一单位。

2. 教学服务团队须有在线教学服务人员和技术支持人员，请在备注中说明。

2.实验教学项目描述

2-1 名称

氮化镓发光二极管工艺制造与光电特性虚拟仿真实验

2-2 实验目的

氮化镓(GaN)基第三代宽禁带半导体具有禁带宽、直接带隙等优异特性，特别适合制备高效发光二极管(Light-emitting diode, LED)，在固态照明、信息产业、装备制造、国家安全、医疗健康等领域具有广泛应用前景和巨大实用价值。2014 年诺贝尔物理学奖授予了研发 GaN 蓝光 LED 的三位科学家，而西安电子科技大学在蓝光、紫外等 GaN LED 领域也进行了长期的研究工作，并在 2014 年和 2015 年先后获得陕西省科学技术一等奖和国家科学技术进步奖二等奖。因此，为了进一步提升微电子专业人才培养质量，西安电子科技大学基于自主 GaN LED 科研成果反哺教学，依托国家级集成电路设计与制造虚拟仿真实验教学中心开展了氮化镓发光二极管工艺制造与光电特性的虚拟仿真实验。

实际氮化镓发光二极管的制造工艺耗时较长，工艺设备价格昂贵，工艺环境条件要求苛刻，工艺过程涉及强酸、强碱、多种危险性气体和材料，且工艺运转与维护的难度和费用都很大。因此为了使學生能够更形象、更直观地理解 GaN LED 的制作工艺，分析 GaN LED 的关键工艺和结构参数对器件光电特性的影响和规律，理解 GaN LED 的发光机理。本实验教学项目采用一种成熟的器件与工艺 TCAD 仿真工具 Silvaco 搭建一个虚拟的半导体制造工厂，对 GaN LED 光电特性进行虚拟仿真实验，作为真实实验的有效补充，以激发学生的创新思维与学习兴趣，增强学生对器件工艺原理和工作机理的理解、吸收和拓展，并增强学生的虚拟仿真实践动手能力，为高水平、高素质、强能力的集成电路人才培养奠定一定的基础。

2-3 实验原理（或对应的知识点）

本实验教学项目所涉及的相关知识包括，半导体物理、半导体器件物理、集成电路制造技术、化合物半导体材料与器件等，具有原理性、综合性、系统性和应用性强的特点，旨在培养学生对氮化镓发光二极管的制造工艺、光电特性分析等方面的知识和能力，增强学生对氮化镓发光二极管工作机理的理解。

1. 氮化镓发光二极管结构

传统 GaN LED 结构由 p-n 结构成，该 p-n 结由 p 型 GaN 和 n 型 GaN 组成。在 p-n 结两端加上一定的正向偏压时，p-n 结的能带图发生变化，如图 1 所示。这时，n 型 GaN 区的电子向 p 区扩散，p 型 GaN 区的空穴向 n 区扩散，电子和空穴在耗尽区发生辐射复合从而发射出光子。光子的波长与 GaN 的禁带宽度 E_g 有如下的关系式：

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \tag{1}$$

其中， h 是普朗克常数， c 为光速。然而，这种传统结构的 LED 发光效率极低，发出的光子容易被价带的电子吸收，所以无法做成实用的 LED 器件。

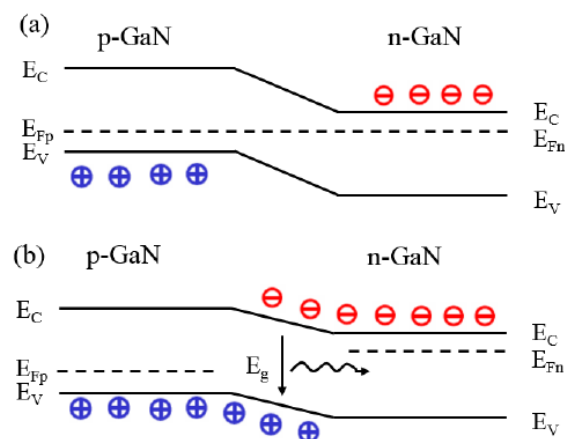


图 1 (a)热平衡下和(b)正向偏压下 p-n 结能带图

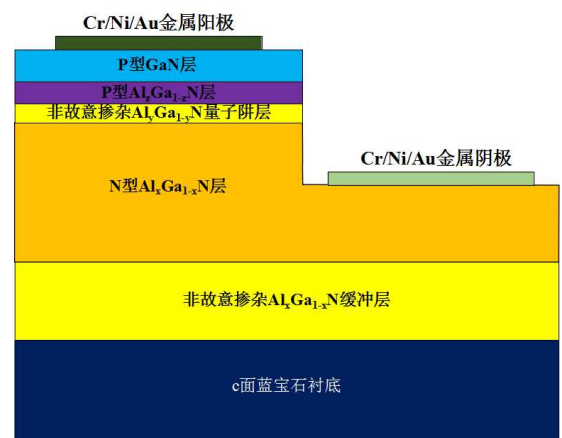


图 2 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 的基本结构

为了显著提高器件的发光效率，本实验项目基于自主科研成果，采用了单量子阱

的 GaN LED 器件结构，该单量子阱材料可以为 AlGa_N、InGa_N 等，通过改变单量子阱材料中的 Al 组分、In 组分等，可以调制器件中单量子阱材料的禁带宽度，从而可以实现发射不同波段光的 GaN LED。为了进一步说明单量子阱 GaN LED 的发光原理，图 2 给出了采用 AlGa_N 单量子阱材料的 GaN LED 结构。该器件结构自下而上包括，c 面蓝宝石衬底、非故意掺杂 Al_xGa_{1-x}N 缓冲层、N 型 Al_xGa_{1-x}N 层、非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层、P 型 Al_zGa_{1-z}N 层、P 型 GaN 层，器件中采用了刻蚀形成的台面结构，在下台面 N 型 Al_xGa_{1-x}N 层上制作有 Cr/Ni/Au 金属阴极，在上台面 P 型 GaN 层上制作有 Cr/Ni/Au 金属阳极。

2. 工作原理

图 3 给出了对应图 2 中 AlGa_N 单量子阱 GaN LED 器件在正向偏压下的能带结构，结合图 2 和图 3 可见，由于 P 型 Al_zGa_{1-z}N 层和 N 型 Al_xGa_{1-x}N 层中的 Al 组分均大于非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层中的 Al 组分，而 Al 组分越大则材料禁带宽度越大，因此由 N 型 Al_xGa_{1-x}N 层、非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层、P 型 Al_zGa_{1-z}N 层实际上构成了一个双异质结结构，该双异质结结构的中间层，即非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的禁带宽度最小，而两端材料的禁带宽度大，所以会在能带中形成一个类似阱的形状，且当单量子阱材料的厚度只有几个纳米的时候，便会形成量子化能级，如图 3 所示。当外加一定的正向电压时，n 型区的电子进入阱中后，由于电子势垒的阻挡作用，电子会被限制在阱内；同理，p 区的空穴进入阱中后，由于存在着空穴势垒，空穴也会被限制在阱内。此时被限制在阱内的电子空穴发生辐射复合，释放出光子。单量子阱 GaN LED 器件结构能有效提升辐射复合的概率，增强 LED 的发光效率。此外，根据公式(1)，单量子阱 GaN LED 可发出光波的波长由单量子阱材料的禁带宽度 E_{g2} 决定。

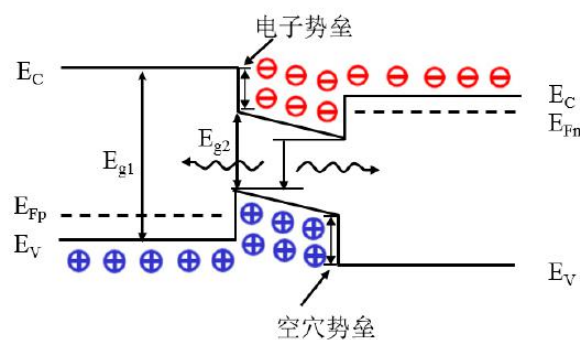


图 3 正向偏压下 AlGa_N 单量子阱 GaN LED 器件中双异质结能带图

2-4 实验仪器设备（装置或软件等）

Silvaco TCAD 半导体工艺与器件虚拟仿真软件

2-5 实验材料（或预设参数等）

本实验中氮化镓发光二极管可以采用的单量子阱材料可以为 AlGa_xN、InGa_xN 等，实验中学生可以根据自己所掌握的知识及 LED 器件工作原理创造性地选择量子阱材料，实现 GaN LED 发射不同波长的光。本实验教学项目重点以图 2 中采用 AlGa_xN 单量子阱的 GaN LED 为例进行实验和详细说明，表 1 给出了该器件的结构参数和材料参数。

在进行实验时，学生可以根据需要设置器件的结构和材料参数，同时也可以改变器件的阳极和阴极偏置电压，在保持其他参数不变情况下，改变其中一个参数，分析 AlGa_xN 单量子阱 GaN LED 器件的光电特性和规律。此外，在进行仿真时，要保证非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的 Al 组分小于非故意掺杂 Al_xGa_{1-x}N 缓冲层和 P 型 Al_zGa_{1-z}N 层中的 Al 组分，以便形成量子阱。

表 1 AlGa_xN 单量子阱 GaN LED 器件的结构参数和材料参数

参数符号	参数含义	取值范围
h_1	非故意掺杂 Al _x Ga _{1-x} N 缓冲层的厚度	$1\mu\text{m}\leq h_1\leq 4\mu\text{m}$
x	非故意掺杂 Al _x Ga _{1-x} N 缓冲层的 Al 组分	$0.2\leq x\leq 0.7$
h_2	N 型 Al _x Ga _{1-x} N 层的厚度	$0.2\mu\text{m}\leq h_2\leq 1\mu\text{m}$ 注：其 Al 组分与非故意掺杂 Al _x Ga _{1-x} N 缓冲层的 Al 组分取值相同
N_1	N 型 Al _x Ga _{1-x} N 层的掺杂浓度	$5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}\leq N_1\leq 1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$
h_3	非故意掺杂 Al _y Ga _{1-y} N 量子阱层的厚度	$2\text{nm}\leq h_3\leq 10\text{nm}$
y	非故意掺杂 Al _y Ga _{1-y} N 量子阱层的 Al 组分	$0.1\leq y\leq 0.6$
h_4	P 型 Al _z Ga _{1-z} N 层的厚度	$5\text{nm}\leq h_4\leq 50\text{nm}$
N_2	P 型 Al _z Ga _{1-z} N 层的掺杂浓度	$5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}\leq N_2\leq 1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$
z	P 型 Al _z Ga _{1-z} N 层的 Al 组分	$0.3\leq z\leq 0.8$
h_5	P 型 GaN 层的厚度	$20\text{nm}\leq h_5\leq 200\text{nm}$
N_3	P 型 GaN 层的掺杂浓度	$1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}\leq N_3\leq 1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$

2-6 实验教学方法（举例说明采用的教学方法的使用目的、实施过程与实施效果）

本实验教学项目所涉及的相关知识较多，具有原理性、综合性、系统性和应用性强的特点，因此在进行实验教学过程中采用了课堂精讲核心知识、虚拟仿真实验案例讲授、课后在线虚拟实践模块的多元教学模式，取得了较好的教学效果。

1. 课堂精讲核心知识

本实验项目基于 Silvaco TCAD 商用仿真软件进行，主要涉及氮化镓发光二极管的虚拟工艺实现和器件特性仿真两部分。对于器件虚拟工艺实现部分，重点讲解虚拟仿真程序的框架结构和工艺语句描述方法。框架结构语句包括，仿真初始化命令、定义用户网格、衬底参数描述、仿真过程的可视化和图形刷新命令、定义电极位置及初始电压、保存文件命令、仿真结束语句等。对于器件特性仿真部分，仿真程序需要满足一定规则，仿真程序通常由六段构成，分别为，定义输入输出文件、定义电极、定义物理模型、储存计算变量、定义数学算法以及方程求解。通过课堂精讲核心知识，使学生可以准确把握虚拟仿真要点，加深学生对虚拟仿真程序的理解，为后续学生的独立虚拟仿真实验奠定了基础。

2. 虚拟仿真实验案例讲授

本实验项目中的氮化镓发光二极管可以采用 AlGa_N、InGa_N 等作为单量子阱材料，学生可以根据需要的光波波长选择相应的量子阱材料。在授课过程中，为了便于讲解，本实验项目教学中采用虚拟仿真实验案例讲授的教学方法，以采用 AlGa_N 单量子阱的 GaN LED 器件作为典型虚拟仿真实验案例进行重点讲授。由于 AlGa_N 单量子阱 GaN LED 器件的结构参数和材料参数众多，仿真程序中涉及的语句和规则较多，为了将仿真流程讲解透彻，使学生容易上手，以具有不同 Al 组分非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的 GaN LED 的虚拟工艺实现和器件特性仿真为典型实验，进行了详细且具体的仿真实验演示。具体过程为：

(1) 器件虚拟工艺实现部分。调用 Silvaco 虚拟工艺模块 Athena，重点介绍器件虚拟工艺实现所涉及的 MOCVD(金属有机物化学气相淀积)设备、RIE(反应离子刻蚀)设备等主要虚拟设备和工艺技术的语法构成和使用规则等。接下来按照 AlGa_N 单量子阱 GaN LED 的器件结构，采用 MOCVD 虚拟设备在 c 面蓝宝石衬底上依次外延非故意掺杂 Al_xGa_{1-x}N 缓冲层、N 型 Al_xGa_{1-x}N 层、非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层、P 型 Al_zGa_{1-z}N 层、P 型 GaN 层，各外延层均采用原位掺杂实现均匀掺杂浓度；然后采用

RIE 虚拟设备刻蚀形成台面结构，最后在下台面和上台面分别制作 Cr/Ni/Au 金属阴极和 Cr/Ni/Au 金属阳极，完成整个器件的制作。在外延非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层时，设置 Al 组分分别为 0.3、0.4 和 0.5 三种不同情况，从而获得三种器件结构样品。

(2)器件特性仿真部分。调用 Silvaco 器件特性仿真模块 Atlas，针对器件虚拟工艺实现部分所获得的三种 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件，重点介绍器件特性仿真部分的程序组成结构。首先调用采用虚拟工艺所实现的三种 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件结构，接着依次定义氮化镓基异质结的极化效应模型，定义材料模型参数，定义器件数值仿真所采用的 k.p 能带参数模型、Fermi-Dirac 统计分布模型、浓度依赖 SRH 模型、auger 模型、带-带复合模型，定义 Caughey Thomas 载流子迁移率模型、高场迁移率模型等。在数学模块中，定义器件仿真时用到的算法，包括仿真器类型、仿真误差标准控制、迭代次数的设置等。在求解模块中，定义求解所使用的泊松方程，电流连续性方程，以及扫描步长的设置和目标电极电压的设定等。最后仿真获得器件的开态电流-电压特性(I-V 特性)、电流-输出功率(I-L 特性)、电致发光谱特性(EL 谱特性)，仿真结果可通过 TonyPlot 看图软件直观地看到。通过将具有不同 Al 组分非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层的三种 GaN LED 器件的光电特性的综合对比研究，可以分析 Al 组分对器件光电特性的影响和规律，最后利用仿真得到能带结构图、载流子浓度分布图、载流子复合率分布图等剖析 Al 组分影响器件光电特性的物理机制，利用 Origin 专业数据处理软件对仿真结果进行处理，形成实验报告。

3. 课后在线虚拟实践模块

建立了氮化镓发光二极管虚拟实验相关的在线学习虚拟实践平台，该平台为学生的课后学习提供了内容丰富、形式多样的学习素材，涉及典型虚拟仿真实验、工艺动画演示、重点知识讲解教师授课教学视频、国内外先进工艺视频等，利用虚拟仿真实验案例讲授和课后在线虚拟实践模块激发了学生的学习热情，使学生能够多方位、更容易、更深入、更直观地学习、理解氮化镓发光二极管的制造工艺原理和工作机理，有力地提升了教学质量。

2-7 实验方法与步骤要求（学生操作步骤应不少于 10 步）

1. 实验程序介绍

打开 Silvaco 软件中的 deckbulid 程序运行窗口，并调入基本模拟程序，如图 4。

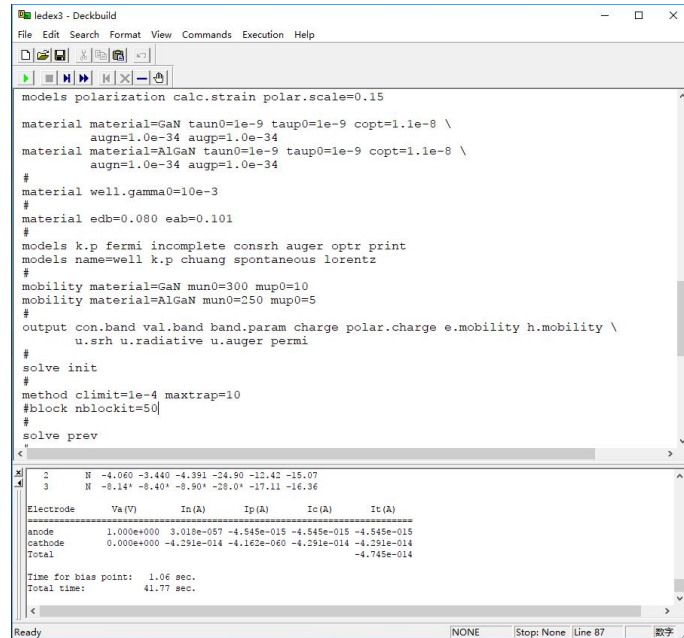


图 4 Silvaco 软件中 deckbulid 程序运行窗口及基本模拟程序

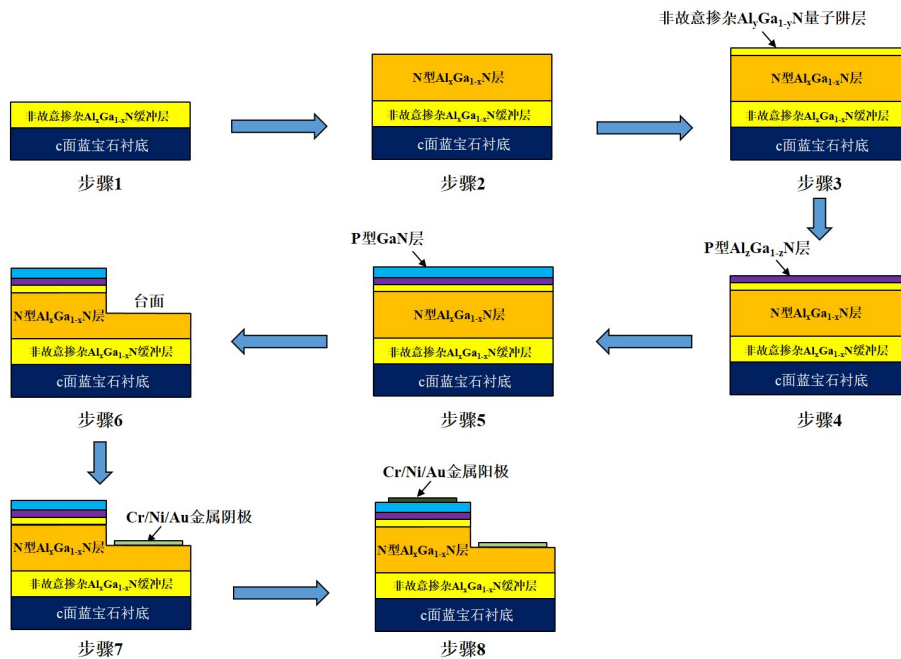


图 5 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 的虚拟工艺实现步骤

本项目实验程序主要由虚拟工艺和器件特性仿真两部分组成，虚拟工艺部分用于实现 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件结构，器件特性仿真部分用于进行器件光电特性仿真分析。图 5 给出了 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 的虚拟工艺实现步骤，具体虚拟工艺步骤及器件结构和材料参数如下：

步骤 1：在 c 面蓝宝石衬底上，采用 MOCVD 外延厚度为 h_1 ($1\mu\text{m}\leq h_1\leq 4\mu\text{m}$)、Al 组分为 x ($0.2\leq x\leq 0.7$) 的非故意掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层；

步骤 2：在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层上外延厚度为 h_2 ($0.2\mu\text{m}\leq h_2\leq 1\mu\text{m}$)、掺杂浓度为 N_1 ($5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}\leq N_1\leq 1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)、Al 组分 x 与 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层相同的 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层；

步骤 3：在 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上外延厚度为 h_3 ($2\text{nm}\leq h_3\leq 10\text{nm}$)、Al 组分为 y ($0.1\leq y\leq 0.6$) 的非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层；

步骤 4：在 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层上外延厚度为 h_4 ($5\text{nm}\leq h_4\leq 50\text{nm}$)、Al 组分为 z ($0.3\leq z\leq 0.8$)、掺杂浓度为 N_2 ($5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}\leq N_2\leq 1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$) 的 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层；

步骤 5：在 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层上外延厚度为 h_5 ($20\text{nm}\leq h_5\leq 200\text{nm}$)、掺杂浓度为 N_3 ($1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}\leq N_3\leq 1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$) 的 P 型 GaN 层；

步骤 6：采用干法刻蚀工艺，在所制备的外延层上进行干法刻蚀，制作台面结构，下台面位置应低于非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层与 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层的异质界面；

步骤 7：在下台面 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阴极；

步骤 8：在上台面 P 型 GaN 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阳极，完成整个 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件的制作。

在获得 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件样品后，进行器件光电特性仿真，利用 TonyPlot 看图软件分析器件的 I-V 特性、I-L 特性、EL 谱特性的特点和规律，并利用 TonyPlot 看图软件给出各器件样品中的能带结构图、载流子浓度分布图、载流子复合率分布图等，剖析 Al 组分影响器件光电特性的物理机制，最后利用 Origin 专业数据处理软件对仿真结果进行处理，形成实验报告。

2. 实验方法与步骤

在氮化镓发光二极管的虚拟仿真中，学生可以根据需要设置器件的结构和材料参数，同时也可以改变器件的阳极和阴极偏置电压，在保持其他参数不变情况下，改变

其中一个参数，分析器件的光电特性和规律。这里针对本实验教学项目中 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件典型虚拟仿真实验案例重点说明具体实验方法和步骤，实验中通过改变非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层的 Al 组分，获得不同器件样品，分析 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层 Al 组分对器件光电特性影响和规律。

(1) AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件的虚拟工艺实现过程

①非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层的 Al 组分 y 取 0.3 时器件的虚拟工艺实现过程。

步骤 1：在 c 面蓝宝石衬底上，采用 MOCVD 外延厚度 $h_1=2\mu\text{m}$ 、Al 组分 $x=0.4$ 的非故意掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层；

步骤 2：在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层上外延厚度 $h_2=0.53\mu\text{m}$ 、掺杂浓度 $N_1=1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、Al 组分 $x=0.4$ 的 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层；

步骤 3：在 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上外延厚度 $h_3=3\text{nm}$ 、Al 组分 $y=0.3$ 的非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层；

步骤 4：在 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层上外延厚度 $h_4=10\text{nm}$ 、Al 组分 $z=0.5$ 、掺杂浓度 $N_2=1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层；

步骤 5：在 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层上外延厚度 $h_5=80\text{nm}$ 、掺杂浓度 $N_3=1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的 P 型 GaN 层；

步骤 6：采用干法刻蚀工艺，在所制备的外延层上进行干法刻蚀，制作台面结构，下台面位置应低于非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层与 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层的异质界面；

步骤 7：在下台面 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阴极；

步骤 8：在上台面 P 型 GaN 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阳极，完成量子阱层 Al 组分取 0.3 的 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件的制作。

②非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层的 Al 组分 y 取 0.4 时器件的虚拟工艺实现过程。

步骤 1：在 c 面蓝宝石衬底上，采用 MOCVD 外延厚度 $h_1=2\mu\text{m}$ 、Al 组分 $x=0.5$ 的非故意掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层；

步骤 2：在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层上外延厚度 $h_2=0.53\mu\text{m}$ 、掺杂浓度 $N_1=1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、Al 组分 $x=0.5$ 的 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层；

步骤 3：在 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上外延厚度 $h_3=3\text{nm}$ 、Al 组分 $y=0.4$ 的非故意掺杂

$\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层;

步骤 4: 在 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层上外延厚度 $h_4=10\text{nm}$ 、Al 组分 $z=0.6$ 、掺杂浓度 $N_2=1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层;

步骤 5: 在 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层上外延厚度 $h_5=80\text{nm}$ 、掺杂浓度 $N_3=1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的 P 型 GaN 层;

步骤 6: 采用干法刻蚀工艺, 在所制备的外延层上进行干法刻蚀, 制作台面结构, 下台面位置应低于非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层与 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层的异质界面;

步骤 7: 在下台面 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阴极;

步骤 8: 在上台面 P 型 GaN 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阳极, 完成量子阱层 Al 组分取 0.4 的 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件的制作。

③非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层的 Al 组分 y 取 0.5 时器件的虚拟工艺实现过程。

步骤 1: 在 c 面蓝宝石衬底上, 采用 MOCVD 外延厚度 $h_1=2\mu\text{m}$ 、Al 组分 $x=0.6$ 的非故意掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层;

步骤 2: 在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 缓冲层上外延厚度 $h_2=0.53\mu\text{m}$ 、掺杂浓度 $N_1=1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 、Al 组分 $x=0.6$ 的 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层;

步骤 3: 在 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上外延厚度 $h_3=3\text{nm}$ 、Al 组分 $y=0.5$ 的非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层;

步骤 4: 在 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层上外延厚度 $h_4=10\text{nm}$ 、Al 组分 $z=0.7$ 、掺杂浓度 $N_2=1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层;

步骤 5: 在 P 型 $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层上外延厚度 $h_5=80\text{nm}$ 、掺杂浓度 $N_3=1\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 的 P 型 GaN 层;

步骤 6: 采用干法刻蚀工艺, 在所制备的外延层上进行干法刻蚀, 制作台面结构, 下台面位置应低于非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层与 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层的异质界面;

步骤 7: 在下台面 N 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阴极;

步骤 8: 在上台面 P 型 GaN 层上制作 Cr/Ni/Au 金属阳极, 完成量子阱层 Al 组分取 0.5 的 AlGaIn 单量子阱 GaN LED 器件的制作。

(2)AlGa_yN 单量子阱 GaN LED 器件光电特性的虚拟仿真和分析

利用器件特性仿真语句仿真 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的 Al 组分分别为 0.3、0.4、0.5 时，器件样品的光电特性。具体步骤如下：

步骤 1：仿真 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层 Al 组分 y 取 0.3 时器件的 I-V 特性、I-L 特性、EL 谱特性，获得仿真结果；

步骤 2：仿真 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层 Al 组分 y 取 0.4 时器件的 I-V 特性、I-L 特性、EL 谱特性，获得仿真结果；

步骤 3：仿真 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层 Al 组分 y 取 0.5 时器件的 I-V 特性、I-L 特性、EL 谱特性，获得仿真结果。

步骤 4：器件阴极的偏置电压设置为 0V，设置器件阳极偏置电压为 5.5V 时，仿真 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层 Al 组分 y 取 0.3 时器件内部电流密度分布情况，获得仿真结果。

步骤 5：综合比较和研究步骤 1~3 中各器件的 I-V 特性、I-L 特性、EL 谱特性，分析 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的 Al 组分对器件光电特性的影响和规律，分析步骤 4 中器件内部电流密度分布特点和规律，并利用仿真得到能带结构图、载流子浓度分布图、载流子复合率分布图等剖析 Al 组分影响器件光电特性物理机制，利用 Origin 专业数据处理软件对仿真结果进行处理，形成实验报告。

2-8 实验结果与结论要求

氮化镓发光二极管的结构和材料参数很多，在虚拟仿真中，学生可以根据需要设置器件的结构和材料参数，可保持其他参数不变而仅改变其中一个参数，分析器件的光电特性和规律，并利用 Origin 专业数据处理软件对仿真结果进行处理。以下给出 AlGa_yN 单量子阱 GaN LED 器件典型虚拟仿真实验案例中，改变 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的 Al 组分影响器件光电特性的结果和结论。

图 6 给出了仿真得到的 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层 Al 组分为 0.3 时的器件样品结构。图 7~9 分别给出了仿真得到的 GaN LED 器件的 I-V 特性、I-L 特性和 EL 特性，图 10~12 分别为对应图 7~9 中器件的能带图、载流子复合率图和载流子密度分布图。图 13 给出了 Al 组分为 0.3 时 AlGa_yN 单量子阱 GaN LED 器件中的电流密度分布情况。仿真中，N 型 Al_xGa_{1-x}N 层的 Al 组分 x，非故意掺杂 Al_yGa_{1-y}N 量子阱层的 Al 组分 y，P 型

$\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ 层的 Al 组分 z ，满足关系 $z-y=0.2$ ，且 $x-y=0.1$ 。

由图 7 可见，随着量子阱层 Al 组分的增加，器件开启电压逐渐增加，且同一偏置下器件的输出电流减小。结合图 10 可知，Al 组分的增加会导致非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层两侧材料的势垒增大，进而导致空穴注入量减小，器件内部电阻增加。因此，开启电压增大，同一偏置下器件的输出电流变小。

由图 8 可见，随着量子阱层 Al 组分的增加，同一注入电流下器件的发光功率逐渐降低。结合图 10~12 可知，Al 组分的增加会使正向偏置下 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱中电子和空穴的辐射复合率下降，引起 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱中的电子和空穴浓度均增加，因此有效参与辐射复合的电子和空穴数量减少，器件的发光功率减小。

由图 9 可见，虽然各器件中量子阱层 Al 组分不同，但器件所发出的光均属于紫外波段。随着量子阱层 Al 组分的增加，器件功率谱密度峰值逐渐向短波移动，且功率谱密度峰值强度也相应减弱，说明 GaN LED 的发光波长随着 Al 组分增加而减小。结合图 10 可知，随着量子阱中 Al 组分的增加，非故意掺杂 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层的禁带宽度增大，根据公式(1)，器件发光波长相应减小。此外，结合图 8 可知，由于 Al 组分增加导致光功率减小，因此，器件功率谱密度峰值强度会随着 Al 组分增加而减小。

由图 13 可见，LED 中的电流密度分布出现了分布不均匀的问题，这主要是由于器件存在台面结构，造成器件中载流子扩散运动异常所致。

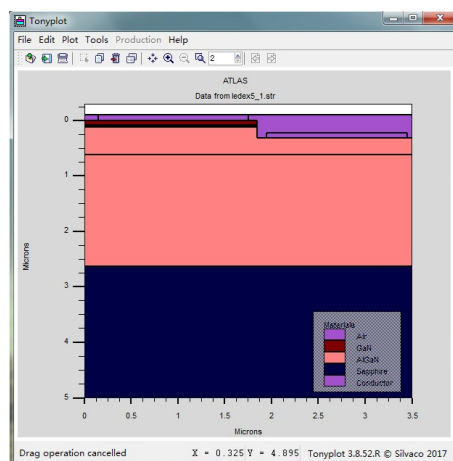


图 6 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 量子阱层 Al 组分为 0.3 时器件样品结构

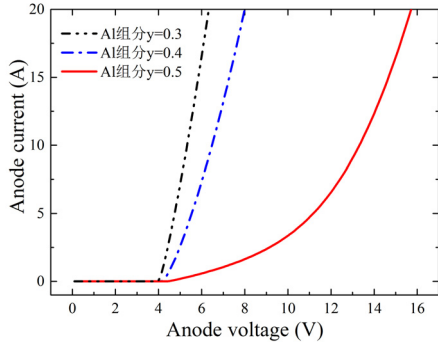


图 7 不同 Al 组分 LED 的 I-V 特性

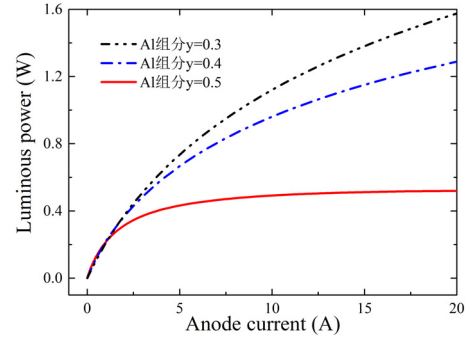


图 8 不同 Al 组分 LED 的 I-L 特性

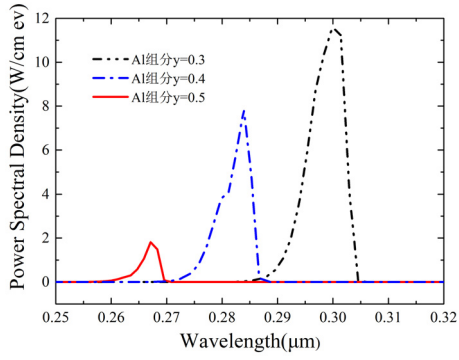


图 9 阳极电压为 6V 时不同 Al 组分 LED 的 EL 特性

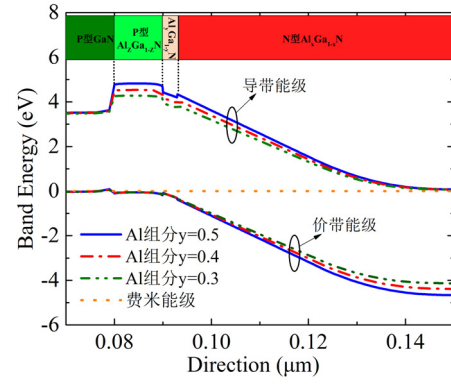


图 10 不同 Al 组分 LED 的能带图

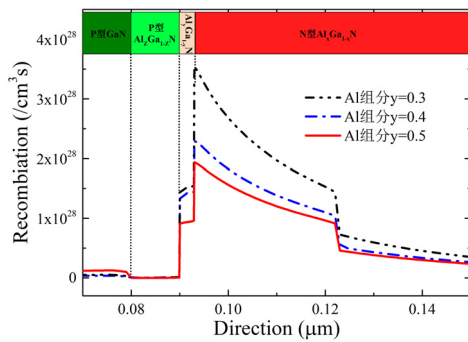


图 11 电流为 6A 时不同 Al 组分 LED 复合率

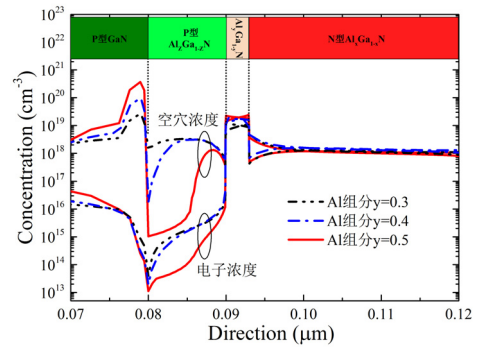


图 12 电流为 6A 时不同 Al 组分 LED 中载流子浓度

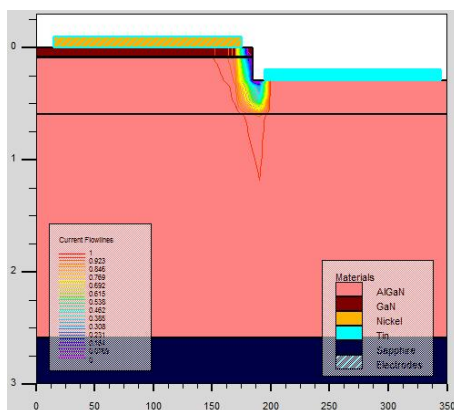


图 13 阳极偏置在 5.5V，Al 组分为 0.3 的 LED 中电流密度分布

2-9 考核要求

通过本实验希望可以使学生熟悉和掌握氮化镓发光二极管的工艺实现和光电特性的相关知识，提升学生的独立思考能力和实践动手能力，为高水平、高素质、强能力的集成电路人才培养奠定一定的基础。具体要求如下：

1. 熟悉氮化镓发光二极管的结构和工作原理；
2. 熟悉氮化镓发光二极管的工艺实现过程；
3. 掌握氮化镓发光二极管的虚拟工艺实现和器件特性仿真所涉及的仿真程序，并可进行独立的仿真实验和分析；
4. 掌握氮化镓发光二极管的结构和材料参数对器件光电特性的影响和规律；
5. 能够熟练利用 Silvaco 仿真软件和 Origin 专业数据处理软件对仿真结果进行处理，形成实验报告。

2-10 面向学生要求

（1）专业与年级要求

本实验适用专业包括，微电子科学与工程、集成电路设计与集成系统，其他相关专业有基础与兴趣的同学可以选做全部或者其中部分实验内容。实验适合开设学期为本科第 6 学期。

（2）基本知识和能力要求等

本实验教学项目所涉及的相关知识较多，具有原理性、综合性、系统性和应用性强的特点，因此要求学生在进行虚拟实验前，应先修的课程包括，半导体物理、半导

体器件物理、集成电路制造技术、化合物半导体材料与器件等。此外，要求学生具有创新精神，能够具备一定的实践动手能力以及独立分析和解决问题的能力。

3.实验教学项目相关网络要求描述

3-1 有效链接网址

网址：<http://icdm.xidian.edu.cn/>

3-2 网络条件要求

- (1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）
客户端有效带宽需要 10Mbps
- (2) 说明能够提供的并发响应数量（需提供在线排队提示服务）
并发数量可同时支持 40 个用户完成同一实验，80 个用户同时在线完成 2 个以上实验（由于 license 限制，同一实验限制在 40 用户以内）

3-3 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

- (1) 计算机操作系统和版本要求
用户计算机系统支持 windows7
- (2) 其它计算终端操作系统和版本要求
其他计算终端暂不支持，计划在 2018 年 7 月支持 iOS, linux

3-4 用户非操作系统软件配置要求（如浏览器、特定软件等）

- (1) 计算机非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）
用户需配置 IE10 浏览器和 Xmanager3 以上版本
- (2) 其它计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）
无

3-5 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

- (1) 计算机硬件配置要求
建议使用 CPU 主频 2GHz 以上、内存 4G 以上、显存 512M，存储容量大于 10G
- (2) 其它计算终端硬件配置要求
建议网络接口速率不小于 100Mbps

3-6 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

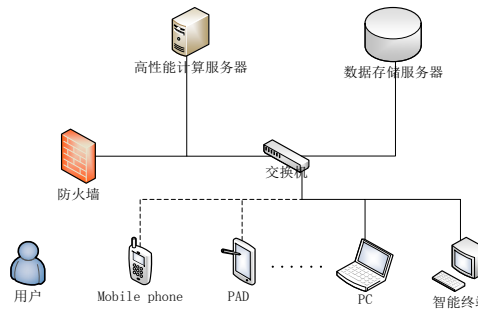
（1）计算机特殊外置硬件要求

无

（2）其它计算终端特殊外置硬件要求

无

4. 实验教学项目技术架构及主要研发技术

指标		内容
系统架构图及简要说明		 实验平台采用服务器、交换机、用户终端的拓扑形式，由高性能计算服务器提供计算资源、用户管理与 license 服务，数据存储服务器提供 EDA 工具、数据库、用户数据等，交换机提供服务器与用户的高速连接，用户可以通过 PC 机、PAD 等有线、无线终端连接到服务器，登陆账号，进行虚拟实验。
实验教学项目	开发技术（如：3D 仿真、VR 技术、AR 技术、动画技术、WebGL 技术、OpenGL 技术等）	2D、3D 技术，AR 技术、动画技术，WebGL 技术、OpenGL 技术
	开发工具（如：Unity3d、Virtools、Cult3D、Visual Studio、Adobe Flash、百度 VR 内容展示 SDK 等）	Visual Studio、Adobe Flash、SDK、Cadence、Synospys、Mentor、Silvaco
管理平台	开发语言（如：JAVA、.Net、PHP 等）	PHP、C、C++、Perl、TCL
	开发工具（如：Eclipse、Visual Studio、NetBeans、百度 VR 课堂 SDK 等）	Eclipse、Visual Studio、NetBeans、百度 VR 课堂 SDK
	采用的数据库（如：Mysql、SQL Server、Oracle 等）	SQL Server

5. 实验教学项目特色

（运用信息技术开展教学理念、教学内容、教学方式方法、开放运行、评价体系等方面的特色情况介绍，不超过 800 字。）

微电子专业实验对实验环境要求高，设备昂贵，工艺过程涉及强酸、强碱、多种危险性气体和材料，真实实验设施投入巨大。因此，为了拓展专业实践领域、丰富教学内容，提升学生的综合素质和技能，西安电子科技大学开设并实施了氮化镓发光二极管工艺制造与光电特性虚拟仿真实验。

本实验项目取材于西安电子科技大学自主科研成果，目前面向全校学生开放，同时对兄弟院校相关专业开放。项目建设依托西安电子科技大学国家级集成电路设计与制造虚拟仿真实验教学中心、微电子学与固体电子学特色优势学科，以提高人才培养综合素质为核心，充分把握学生实验学习特点和规律，采用课堂精讲核心知识、虚拟仿真实验案例讲授、课后在线虚拟实践模块的多元教学模式，努力构建优势资源融合、教学科研协同人才培养实验教学新机制。本项目以西安电子科技大学在宽禁带半导体材料方面的科研成果为依托，以 GaN 发光二极管工艺制备和器件研究为具体落脚点，涉及半导体材料的基础性质，材料生长、掺杂、接触等基本工艺过程，以及器件的电学与光学性能表征等知识点，融合了西安电子科技大学在此方向 2014 年所获得的陕西省科学技术一等奖《氮化镓基紫外 LED 技术》以及 2015 年获得的国家科学技术进步二等奖《氮化镓基紫外与深紫外 LED 关键技术》等众多科研成果，涉及了《半导体物理》、《半导体器件物理》，《化合物半导体器件物理》、《集成电路制造技术》等微电子专业主要核心课程。本实验教学项目有效整合了各实验教学资源，构建技术先进、资源优化、开放共享、运行高效、虚实结合的实验教学平台和贴近实际、高度仿真的虚拟实验环境，为学生自主学习、自主实验和创新时间创造了条件。此项目紧密结合教学和科研，将科研理念、文化、成果以及方法融入实验教学，提高学生的科学研究和科技创新能力。

6. 实验教学项目持续建设服务计划

（本实验教学项目今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划，包括面向高校的教学应用计划、持续建设与更新、持续提供教学服务计划等，不超过 600 字。）

在教学应用方面，我单位将利用在微电子行业的影响力，积极与其它兄弟高校交流沟通，特别是针对一些硬件条件不够的高校，免费提供本项目的相关软件供其使用。近年来，我单位已经多次组织面向全国其他高校的免费暑期培训班，社会效果良好。

在项目持续建设与更新方面，主要包括三个方面。一是针对项目现有的实验，在我校内部并推广给其它高校广泛使用，使用的同时可以针对本项目的优缺点进行大量反馈，以便我们能够更好地做出响应的调整、改进并提高。二是在本校内部充分调研，并与其它高校实时沟通，将现有项目不包括，但将同时大家需求强烈的实验纳入建设计划。此外，针对微电子技术发展迅速的特点，实时收集一些新型的实验，比如材料、器件结构等，进行开发，便于学生能够尽快的了解微电子科技发展前沿。三是利用我校教师与国外互访频繁的便利，关顾国外高校在实验教学项目方面的新想法及新举措，提升我校的实验教学内容与水平。目前，我们与美国、欧洲等多所高校开展了多次富有成效的交流。

在提供教学服务计划方面，开展定期或不定期的培训。实验类项目开展的核心的教师，教师的水平决定了实验教学的质量。我校计划针对本项目包含的主要实验，开展对外教师咨询及培训服务。对于一些培训需求量大的实验，我单位可适时组织教师去对方单位提供培训。

总之，我单位实验教学平台方面已经过多年建设，也积累了较丰富的经验，能够完成好项目的持续建设服务。

7. 诚信承诺

本人已认真填写并检查以上材料，保证内容真实有效。

实验教学项目负责人（签字）：

年 月 日

8. 申报学校承诺意见

本学校已按照申报要求对申报的虚拟仿真实验教学项目在校内进行公示，并审核实验教学项目的内容符合申报要求和注意事项、符合相关法律法规和教学纪律要求等。经评审评价，现择优申报。

本虚拟仿真实验教学项目如果被认定为“示范性虚拟仿真实验教学项目”，学校承诺将监督和保障该实验教学项目面向高校和社会开放并提供教学服务不少于 5 年，支持和监督教学服务团队对实验教学项目进行持续改进完善和服务。

（其它需要说明的意见。）

主管校领导（签字）：

（学校公章）

年 月 日