

2019 年 v2.5 版

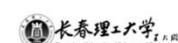
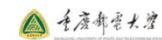
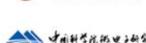
高校微电子相关专业

“虚实联动”实验教学综合建设方案

符合国家虚拟仿真实验教学项目要求

可根据各个高等院校和高职院校实际需求形成定制化方案

现已有国内外 30 余所高校开始使用



2019 年 9 月 30 日

高校微电子相关专业“虚实联动”实验教学综合建设方案

目录

1	背景	3
1.1	微电子与集成电路产业现状	3
1.2	高校微电子实验教育教学现状	4
1.3	建设方案和核心技术优势概览	5
1.4	公司简介：清华系创业团队+20 年工业背景	6
1.5	已有用户介绍	8
2	建设方案	11
2.1	建设思路	11
2.2	课程体系	13
2.3	教学设施	16
2.3.1	7nm 微纳电子器件教学套件	17
2.3.2	14nm 集成电路工艺教学套件	21
2.3.3	7nm 集成电路虚拟现实（VR）实验室	24
2.4	线上资源平台	27
2.5	线上教学平台	29
2.6	教师师资培训	31
2.7	校企共建与企业师资补充	31
2.8	学生培训与就业推荐	33
2.9	集成电路科普	35
3	方案的效果和预期	36
3.1	教学与一线产业接轨，从 7nm 到 3nm	36
3.2	加强信息化与云端化，打造下一代电教实验室	36
3.3	高校师资培训结合企业师资补充，促进高校师资的提升	37
3.4	中美贸易战中的集成电路问题，促进学科招生	38
3.5	提升学生就业率，打造“就业明星”	38
3.6	形成校际资源共享	39
3.7	形成社会资源共享	39
4	建设方案转化为国家虚拟仿真实验教学项目	39
5	实施步骤	40

1 背景

1.1 微电子与集成电路产业现状

当前，中美贸易战持续升温，今年的“华为事件”、去年的“中兴事件”都是中美贸易摩擦中最为重要的写照，如图 1 所示。美国希望在尖端信息技术领域长期占据主导地位，担忧中国以华为为代表的民族企业“弯道超车”，威胁美国在核心信息技术的长期霸主地位。那么，究竟什么是信息科技的基石呢？答案是集成电路。



图 1 中美贸易摩擦下的微电子（集成电路）教育必将成为国之重任

集成电路是整个信息产业的基石，没有集成电路，就没有现代通信、互联网、IOT 等应用层的技术、服务和产品，就会长期受制于人。去年的“中兴事件”就是一个典型的例子，当美国禁止向中兴销售相关集成电路产品时，中兴通讯一度陷入倒闭危机。而从数据上，我们也可以看到，集成电路位于中国进口商品排行榜榜单上的第一位，国内的集成电路自给自足能力还很差。“授之以鱼不如授之以渔”，要想大力发展集成电路，关键还是要依靠核心人才，掌握核心技术。

当前，国内集成电路人才缺口严重，据《中国集成电路产业人才白皮书(2017-2018)》统计，截至 2017 年底，我国集成电路产业现有人才存量约为 40 万人，人才缺口达 32 万人。人才缺口之大，是目前国内集成电路人才的鲜明写照。

那么我们不禁要问，是什么导致出现了人才的缺口？据《中国集成电路产业人才白皮书(2017-2018)》统计，2018 年全国本硕博毕业生数量超过 800 万人，其中微电子专业领域毕业生 20 万，毕业后做本行的只有 3 万，八成以上都在转行。专业毕业生数量是充足的，但真正从事该行业的人太少是问题所在，那这又是什么原因呢？

我们发现，表面现象是毕业生觉得集成电路薪水与互联网金融等产业差距较大。而实际现象是：集成电路是一门知识体系非常复杂的学科，学校出来的学生水平还不足以达到企业用人的要求，企业需要在前期花很长时间（一般是二至三年）培养这些学生，自然不会给出太高的薪水。而像互联网等行业，需要的职位都是“单线条”的职位，比如：Java 等程序员，“0 基础”快速学习 2 个月的时间，就可以基本胜任工作要求，企业自然愿意花更多的钱雇佣这些能直接有产出的毕

业生。

所以，归根结底的原因是集成电路学科的复杂性，知识体系庞大，既不好学，又不好教。高校毕业生学了个一知半解，与工业界脱节，对集成电路知识体系没有信心，前景不明朗，薪水又低，最终选择其他行业；用人单位对毕业生也没有信心，给不出更高的薪水，导致人才严重短缺。

1.2 高校微电子实验教育教学现状

当前集成电路主流工艺已经到了 7 纳米，苹果 A13 处理器、高通骁龙 855 处理器和华为麒麟 980 处理器都已经使用 7 纳米芯片，如图 2 所示，需要我们的高校微电子专业实验教育与工业界更加紧密的接轨。



图 2 当前已进入 7 纳米时代，设备昂贵又易损坏，高校教育与产业存在脱节

微电子（集成电路）的产业链分为芯片设计、晶圆制造、封装、测试等环节，在微电子产业链中，晶圆加工、封装、测试最容易出现工业界与高校教育脱节的现象，这也是当前集成电路人才缺口的“重灾区”。究其原因，可以简单总结为：这些环节都有一个共同的特点，就是在实际工作中，需要有真实制造设备仪器或是工艺线。

一方面：这些真实设备非常昂贵，例如：EUV 光刻机要上亿美元，高校很难采购这些设备用于教学。

另一方面：这些真实设备如果用于教学，新手操作容易损坏这些设备，例如：扎探针过程容易损坏探针，高校也很难将昂贵设备用于教学。

同时，当前集成电路高校教学缺少真实一线产业实践机会，出现这一现象的原因可以归结为三点：

第一、集成电路发展迅速，根据“摩尔定律”，集成电路的集成度每两年就要翻一番，先进技术层出不穷，而学校并没有对应的实践环境。即使有实践环境，

也是相对陈旧的设备和工艺，与真实一线产业集成电路工作脱节。

第二、集成电路设备昂贵，相关设施在实验操作过程中（比如扎探针）容易损坏，工艺线要保证无尘和稳定，即使学校组织学生进行企业实践，企业也很难让学生进行真正意义的实践操作。

第三、由于仪器设备成本高、占用空间大，因此实物实训需要的设备数量有限，学生根本无法做到人手一台设备；同时，实验设备复杂多样，实物实训具有很大的危险性，实验通常也需要很长的时间进行调试，这使得人员与设备的安全性无法保证。

1.3 建设方案和核心技术优势概览

针对 1.1 节和 1.2 节的现状，鉴于高校教育与产业脱节的现象，我们基于 20 年的集成电路一线工业背景，在国内首创“虚实联动”的实验教学思路，拥有独立知识产权，解决高校教育与工业界脱节的问题，如图 3 所示，在核心技术上，我们以真实先进工业场景和真实先进工业数据基础，通过工业级仿真器使得这些数据和场景变为使得学生能够实操的核心技术门槛。

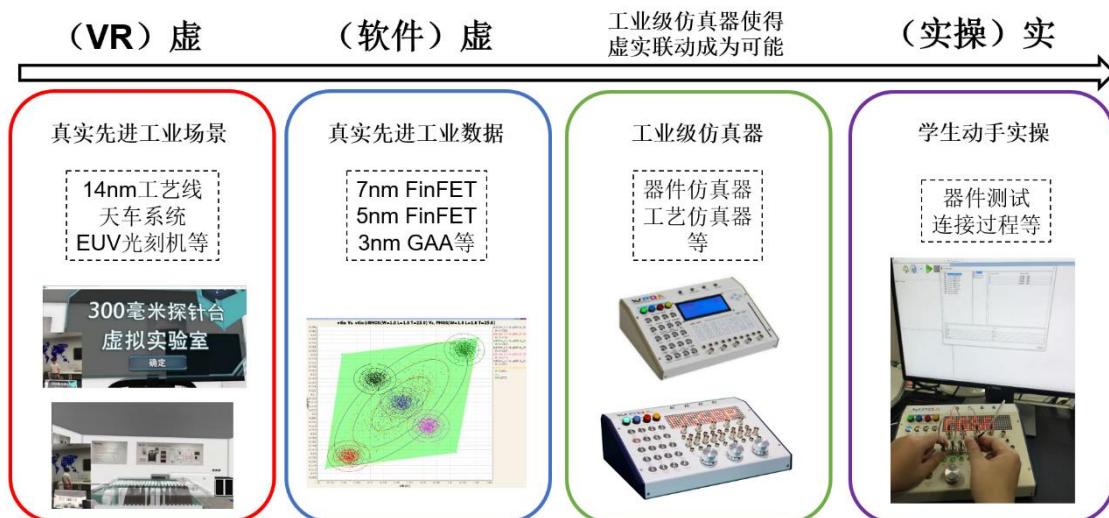


图 3 “虚实联动”核心技术方案

1. 虚拟真实工业场景

我们基于国内先进 Foundry 生产线，实现 14nm 工艺的真实场景，所覆盖的场景内容包括自动化天车系统、EUV 光刻机等，真实与工业界接轨。

2. 采用真实工业数据

我们基于工业界真实数据，可以实现对 7nm FinFET 器件等主流器件的真实模拟，并逐步获取 5nm FinFET、3nm GAA 结构的真实数据，与现在主流工业节点的数据节点一致。

3. 采用工业级仿真器

我们基于工业级 SPICE 和 TCAD 仿真器，可以进行真实器件特性和工艺特性的模拟，让学生实验过程可以调整任意设置和参数，避免传统虚拟仿真所带来的问题，从而为学生实操成为可能。

在产品线上，我们覆盖芯片设计、晶圆制造、封装测试、设备材料、EDA 等多个环节，开发出多组对应产品，采用真实数据和真实工业场景作为素材，研发的工艺节点到 7nm，与工业界主流技术接轨，有效的解决教育与产业链脱节的问题，这些产品由于是“虚实联动”产品，可以通过软升级的方法，快速升级到未来最先进的技术，如 5nm, 3nm 等，无需高校重复采购设备，让学生能够接触最先进的工业级产品的同时，最大程度上缩减高校的支出。通过 VR 等先进的交互方式，让学生有更强的学习积极性，与国家虚拟化教育的战略保持高度一致。

总结，建设方案的优势主要包括：

1. 通过“虚实联动”让学生接触昂贵设备成为可能
2. 通过“虚实联动”让学体验先进数据和真实工业场景成为可能
3. 定期软升级达到最新技术，长期和工业界同步，性价比高，缩减高校支出
4. VR 寓教于乐，提高学生积极性

1.4 公司简介：清华系创业团队+20 年工业背景

北京艾西智酷科技有限公司专注于集成电路人才培养，集合 IC 垂直领域线上学习和社交平台 IC 智库，一站式虚拟化教学产品与云服务平台，形成集成电路从业者教育，高校教育，职业教育，中小学科普教育“四位一体”的商业模式，让人才培养变简单。核心团队来自于清华大学微纳电子系，具有人工智能、大数据、虚拟现实等多重背景，背靠具有 20 年工业经验的一线集成电路公司。艾西智酷致力于通过核心技术解决集成电路人才问题，拥有多项自主知识产权的产品和解决方案，是虚拟化集成电路教育的开创者、互联网+应用于集成电路教育的实践者。公司相关活动如图 4 至图 6 所示。



图 4 艾西智酷与中关村集成电路设计园达成合作协议



图 5 北京市副市长隋振江参观公司产品演示



图 6 艾西智酷总经理姚健参加相关活动

该公司全部产品源自于工业界 EDA 企业北京博达微科技有限公司，该公司作为国内知名的集成电路 EDA 企业，拥有近百家全球领先的半导体公司，大学和科研单位为客户提供，成功将人工智能算法应用在集成电路测试和相关环节，所发表的学术文章荣获 2018 年度 IEEE DATE 大会最佳论文（国际四大顶级 EDA 会议之一），如图 7 所示，并荣获 2019 年度中国 IC 设计成就奖之年度创新 EDA 公司，如图 8 所示。博达微科技有限公司是国内少有的将集成电路工业经验应用在高校教学领域的公司之一，大大推动了国内高校的集成电路教学与真实产业人才需求相结合。博达微联合纽交所上市公司安博教育，组织了首期集成电路短期培

训班，100%的就业率，并得到业界公司的广泛好评。同时，公司开发了国内首个集成电路领域行业深度社交和知识分享 App-IC 智库，注册用户达到 9 万人，推动了国内集成电路的普及，解决了知识获取的瓶颈。博达微科技有限公司在集成电路的工业级教育经验是本次项目能够得以实现的有效保障。



图 7 国际四大顶级 EDA 会议 IEEE DATE 最佳论文奖



图 8 相关荣誉奖项

1.5 已有用户介绍

当前，微电子实验教学建设方案已被清华、北大、复旦、韩国首尔国立大学等国内外 30 余所高校所采用，典型用户如图 9 所示，相关使用情况如图 10 所示。



图 9 典型用户一览





图 10 典型用户使用一览

2 建设方案

2.1 建设思路

我们采用以下四点建设思路进行整体方案建设，如图 11 所示：

- 线上加线下：结合互联网平台，进行先进的实验课程信息化体系建设和实验室信息化建设，校际资源共享；
- 实物加虚拟：实物（实验设备）和虚拟（VR/AR 虚拟，仿真教学设备）各有侧重，发挥教与学的组合拳优势；
- 硬件积木化：最先进的基础模块和可选装的模块组合复用到更多课程，提高资源复用率，降低成本；
- 软件国产化：啃下“华为事件”掐脖子的地方，从学校开始建立未来工业生态。



图 11 建设思路一览

当今院校的集成电路专业面临着时代、技术和生源的变化，教育迫切的面临转变，集成电路教育的内容、技术、教学模式需要重新思考和定义。当前的主要问题包括：集成电路教学与工业实际人才需求脱节、集成电路发展迅猛而教育教学更新迭代较慢。如与企业进行实训，又存在成品高、占地大、难开展、受限制等多方面的困难。基于这些原因，建设集成电路相关的虚拟现实教学设备就显得十分必要。

虚拟现实软件采用“虚拟现实+”等先进的技术理念和技术手段，基于真实的实训环境，真实的实训设备，真实的实训任务和真实的实训流程，构建“理、虚、实”一体化的教学与实训系统，教学模式更加新颖。

通过云平台，教师会在课前发布学习任务，学生接收到通知后，完成个性化学习；教师在课堂中，则着重解决学生的实际问题，进行交流拓展、个性指导、习题讲解、真实项目方案的分析、随堂测验及其他创新的课程教学方式。学生利用虚拟仿真软件以第一视角的体验，进行集成电路晶圆测试的学习和实训，使得

虚拟仿真软件达到“好看、好玩、好用”的品质标准，真正实现寓教于乐的教学目标。同时，老师将对学生的操作痕迹（如是否按照实验步骤操作、是否符合操作规范）等进行形成性评价。综合实验结果与实验要求，学生实训流程、技能操作等各因素，形成综合性成绩，成绩在 60 分以上为合格。

传统的集成电路晶圆测试课程以讲课为主，工程实践较少。如果本项目得以按目标实现，将是对传统教学的一个有效补充。学生可以真正完成学以致用的过程。结合传统教学模式，我们希望形成“学-虚-实”三步走的过程：传统教学作为基本学习，本实验课程作为虚拟实验课程，后期再前往企业或者基于学校的实验条件进行真实实训。

考核方式：通过该实验课的学习，学生应能够具备集成电路晶圆测试流程。考核方式以实验成绩和期末考试两部分组成。实验成绩(60 分)：约 12 次实验课，每次实验课 5 分，包括：实验预习（1 分），实验操作（2 分），实验报告（2 分）。期末考试（40 分）：完成一个典型器件的完整晶圆测试流程，根据学生的操作，计算得分。

通过引入工业级实验课程，在理论教学和实物实训之间搭建起一个过渡的“桥梁”，有效解决理论教学与实物实训难以有效融合的问题，提升相关知识与实训操作的效率和效果，优化学生的学习体验。云平台聚合了完备的教学功能，学生可通过云平台进行学习、下载实验指导书，完成实验报告等，实现教学过程的“闭环控制”和教学效果的“形成性评价”，使教学资源更生动、教学活动更丰富、教学管理更高效、效果评估更科学准确，充分体现出教育信息化的发展方向。

在实施过程过程中：

- 老师首先进行集成电路相关理论教学，并且，老师在云平台上传相关数字化资料（如微课、视频、文献等），学生首先通过云平台进行理论知识的个性化学习。老师可以进行相关设定，比如：学生只有通过理论知识的检测，才能认为已经掌握了相关实验理论，才能进入之后的环节。
- 学生通过先进集成电路虚拟现实体验设备进行自主学习和体验，学生通过了解实验目的，VR 操作方式等环节，进入真实实验状态。虚拟体验平台能够以真实的实验环境、真实的实验任务、真实的实验设备等，让学生能以第一视角体验与交互模式对集成电路相关流程进行体验和分析，完成实验的预设项目。同时，体验设备会对学生的操作（如是否按照实验步骤操作、是否符合操作规范）等进行形成性评价。
- 集成电路虚拟现实能够自动记录、跟踪、评价学生虚拟仿真的过程与结果。教师通过云平台可以查看学生虚拟现实实训表现及各步骤的操作情况，并对学生输出的实验报告进行批改。当评价合格后，学生或有机会进行实物实训演练。

- 实物实验（如条件允许），在学校内部和相关集成电路合作公司，学生可以进行真实的实验，可以通过视频、照片等记录实物实验的过程与结果。通过“理、虚、实”一体化的教学方式，不仅大幅度提高理论与实验教学的效果，提高学生对集成电路晶圆测试的认知，牢记相关步骤，保证学生操作正确、规范，大幅提高学生实验的正确性，弥补实验在教学资源，设备，流程方面的不足。

2.2 课程体系

在课程体系上，覆盖从大三上到研究生过程中，重要的微电子专业核心课程，所涉及的课程类型包含：基础理论，基础实验，进阶实践和科研创新等步骤，课程体系如图 12 和表 1 所示。

建设方案课程体系				
	大三上	大三下	大四上	大四下和研究生
基础理论	工业级半导体器件教学 ● 共48学时			
基础实验	工业级半导体工艺实验 ● ● ● 共48学时	工业级半导体器件测试实验 ● ● ● 共80学时	工业级半导体器件模型 和参数提取实验 ● 共56学时	工业级半导体封装测试试验 ● ● ● 共36学时
进阶实践			工业级半导体版图设计 ● 共36学时	工业级半导体PDK设计 ● 共36学时
科研创新				微纳电子器件科研创新平台 AI与半导体创新平台 ● 自定学时

图 12 建设方案课程体系

表 1 建设方案课程体系详情

课程名称	课程学时	先修课程
工业级半导体器件教学	48 学时	半导体物理
工业级半导体器件测试实验	80 学时	半导体物理、半导体器件原理
工业级半导体器件模型和参数提 取实验	56 学时	半导体器件原理
微纳电子器件科研创新平台	自定学时	工业级半导体器件模型和参数提 取实验
工业级半导体工艺实验	48 学时	半导体物理
工业级半导体版图设计与实验	36 学时	半导体器件、半导体工艺
工业级半导体 PDK 设计与实验	36 学时	半导体器件、半导体工艺

每个课程的具体课程大纲表 2-表 9 所示：

表 2 工业级半导体器件教学

1、二极管器件教学	2、双极晶体管器件教学
3、半导体电阻器件教学	4、结型场效应晶体管教学
5、薄膜晶体管教学	6、半导体电容器件教学
7、MOS 变容器教学	8、180nm NMOSFET 教学
9、SRAM 存储器教学	10、环形震荡器教学
11、FDSOI 器件教学	12、FDSOI 器件教学
13、28nm NMOSFET 教学	14、FinFET 教学
15、GaN HEMT 器件教学	16、LDMOS 教学

表 3 工业级半导体器件测试实验

1: 二极管 IV 特性测量实验	2: 二极管 CV 特性测量实验
3: BJT 输入特性测量实验	4: BJT 输出特性测量实验
5: 半导体扩散电阻测量实验	6: JFET 转移特性测量实验
7: JFET 输出特性测量实验	8: JFET 棚电流特性测量实验
9: TFT 转移特性测量实验	10: TFT 输出特性测量实验
11: 半导体电容器 CV 测量实验	12: MOS 变容器 CV 特性测量实验
13: 180nmNMOS 转移特性测量实验	14: 180nmNMOS 输出特性测量
15: 180nmNMOS 衬偏特性测量实验	16: 180nmNMOS 衬底电流测量
17: 180nmNMOS 电容特性测量实验	18: SRAM 存储器测量实验
19: 环形振荡器测量实验	20: FDSOI 转移特性测量实验
21: FDSOI 输出特性测量实验	22: PDSOI 转移特性测量实验
23: PDSOI 输出特性测量实验	24: PDSOI 棚电容测量实验
25: PDSOI 沟道电容测量实验	26: 28nmNMOS 转移特性测量
27: 28nmNMOS 输出特性测量	28: 28nmNMOS 棚电流特性测量
29: 28nmNMOS 衬底偏置特性测量	30: 28nmNMOS 衬底电流测量
31: 28nmNMOS DIBL 特性测量	32: 28nmNMOS 电容特性测量实验
33: FinFET 转移特性测量实验	34: FinFET 输出特性测量实验
35: FinFET I_{sub} 和 I_g 特性测量实验	36: GaN 转移特性测量实验
37: GaN 输出特性测量实验	38: LDMOS 转移特性测量实验

39: LDMOS 输出特性测量实验

40: LDMOS 电容特性测量实验

表 4 工业级半导体器件模型和参数提取实验

1: 二极管器件建模实验	2: 双极晶体管器件建模实验
3: 半导体电阻建模实验	4: JFET 器件建模实验
5: 薄膜晶体管器件建模实验	6: 半导体电容器建模实验
7: MOS 变容器建模实验	8: 180nm NMOSFET 建模实验
9: FDSOI 器件建模实验	10: PDSOI 器件建模实验
11: 28nm NMOS 器件建模实验	12: FinFET 器件建模实验
13: GaN 器件建模实验	14: LDMOS 器件建模实验

表 5 微纳电子器件科研创新平台

1: 平台说明	2: 从深蓝到 AlphaGo, 什么是人工智能?
3: 用一元线性回归讲讲什么是机器学习?	4: AlphaGo 的算法核心, 什么是深度学习?
5: 如何获取半导体器件特性? 试试深度学习的方法	6: 芯片数据不全? 用相关学习解决问题
7: 用机器学习自动探测芯片坏点	8: 工艺浮动难分析? 从图像识别中找灵感
9: 用机器学习帮助优化电路性能	10: 用机器学习加速芯片测试
11: 开启智能测量时代, 聊聊 IEEE DATE 2018 Best Paper	12: 详细解读智能量测

表 6 工业级半导体工艺实验

1: 二极管制造实验	2: 集成电路电阻制造实验
3: 集成电路电容制造实验	4: MOSFET 阵掺杂工艺实验
5: MOSFET 多晶硅栅工艺实验	6: MOSFET 的 Halo 和 LDD 工艺实验
7: MOSFET 侧墙工艺实验	8: MOSFET 源漏注入工艺实验
9: MOSFET 后端工艺实验	10: MOSFET 栅氧化层厚度工艺浮动实验
11: MOSFET 沟道掺杂浓度工艺浮动实验	12: 双极晶体管制造实验
13: 双极晶体管掺杂浓度工艺浮动实验	14: FinFET 制造实验
15: LDMOS 制造实验	16: GaN 制造实验

表 7 工业级半导体版图设计与实验

1: CORE MOS 版图设计	2: IO-18/25 MOS 版图设计
3: DNW/NT MOS 版图设计	4: MISMATCH MOS 版图设计
5: CV/CCO/LOD MOS 版图设计	6: 应力相关 (WPE/OSE/PSE/MBE) 版图设计
7: Ring Oscillator 版图设计	8: HVMOS 版图设计
9: BJT 版图设计	10: Junction Diode 版图设计
11: MOM 版图设计	12: 4 种 Resistor 的版图设计
13: 2 种 Mismatch Resistor 的版图设计	14: SRAM 版图设计
15: 版图设计提高 (ESD、RF 版图设计)	

表 8 工业级半导体 PDK 设计与实验

1: Schematic Symbols & CDF 基础实验	2: Analog Simulation & callbacks 基础实验
3: Fixed Layouts & Parameterized Cells 基础实验	4: Techfile 设计实验
5: 物理验证 (DRC/LVS/LPE) 基础实验	6: MOSFETS PDK 生成实验
7: Resistor PDK 生成实验	8: Bipolar PDK 生成实验
9: Diode PDK 生成实验	10: Capacitors/MOM PDK 生成实验
11: Varactor PDK 生成实验	

表 9 工业级半导体封装测试实验

1: 装片基础操作实验	2: 键合基础操作实验
3: 塑封基础操作实验	4: SOT23-3/5/6 封装实验
5: SOP-7/8 封装实验	6: SOP-14/16 封装实验
7: ESOP8 封装实验	8: SSOP20/24/28 封装实验
9: LQFP7*7-32/48/64 封装实验	10: QFN3*3/4*4/5*5 封装实验
11: QFN6*6/7*7/8*8 封装实验	12: DFN2*2/2*3/3*3 封装实验
13: DFN4*4/5*5 封装实验	

2.3 教学设施

该建设方案所提供的教学设施如图 13 所示，包括：7nm 微纳电子器件教学套件、14nm 集成电路工艺教学套件和 7nm 集成电路虚拟现实（VR）实验室。



图 13 教学设施一览

2.3.1 7nm 微纳电子器件教学套件

7nm 微纳电子器件教学套件是一款便携式微纳电子器件教学实验平台，该平台模拟最新工业标准半导体器件特性，提供交互式的先进半导体器件测量，器件建模和电路仿真体验。

2.3.1.1 产品简介

半导体工艺已经进入 7nm FinFET 时代，然而相关教学材料（如教科书、课堂讲义和实验设备）却极大地落后于时代步伐，甚至其中一些教学素材仍然在使用 20 年前的内容。这使得学生所掌握的知识与实际半导体行业要求差距甚远。

微纳电子教学套件（器件版）是一款创新型产品，适合于高校，最大限度地减小教学与工业界的差距。兼容工业器件测量、器件建模及虚拟教学等全套理论教学与工程实践流程；涵盖绝大多数现代半导体器件类型（如 FinFET, 28nm planar CMOS, SOI, Bipolar, III/V 及无源器件）；模拟半导体参数测量分析仪对器件进行 IV 测试和 LCR 表对器件进行 CV 测试。该教学套件拥有人性化的图形交互界面，集成了器件特性测量软件，模型提取软件，及 SPICE 仿真功能。微纳电子教学套件（器件版）作为一款强大的实验工具，可以应用于如下场景：

- 微纳电子器件测量实验：模拟真实器件测量行为。
- 半导体物理教学辅助演示：用于直观展示典型半导体物理效应以及典型器件的特性，例如：短沟道效应，应力效应，器件可靠性，工艺浮动等。
- 器件建模教学工具：可让学生体验工业级器件建模行为和电路仿真分析功能。
- 科研工具：基于内置的行业标准 SPICE 建模，接口和强大的图形和数据分析功能，用户能够方便的集成研发的器件模型，快速分析器件和电路的工业标准特性，不需要依赖任何其它软件。

2.3.1.2 产品架构

微纳电子教学套件（器件版）由 DE101™实验箱及 EELab™软件包组成。



图 14 实验箱 - DE101™

器件类型：DE101 左侧面板可模拟的器件列在表 10 中。

表 10 DE101 器件一览

器件名称	器件类型	描述
NMOS 180nm	MOSFET	W=0.24μm, L=0.18μm
LDMOS	MOSFET	W=40μm, L=1.8μm
SOI TB	MOSFET	W=0.15μm, L=0.13μm
BJT NPN	BIPOLAR	Area=1, Areab=1, Areac=1 (Normalized Area)
Diode	DIODE	Area=4e-10m ² , PJ=8e-5m
Resistor	RESISTOR	W=5μm, L=5μm
Capacitor	CAPACITOR	Standard Size
Varactor	VARACTOR	Standard Size
JFET	JFET	W=10μm, L=10μm
TFT	TFT	W=2.5μm, L=5μm
SRAM	CIRCUIT	T=25C°, Vsupply=1.1V
RO	CIRCUIT	T=25C°, Vsupply=1.1V
NMOS 28nm	MOSFET	W=0.1μm, L=0.03μm
FINFET	MOSFET	L=0.02μm, Fin_num=3, Fin_Thick=7nm
FDSOI	MOSFET	W=1μm, L=0.022μm
HEMT GaN	MOSFET	NF=2, WF=20μm

待测器件(DUT)连接方式：右上方的 LED 显示 DUT 各管脚含义，对应 BNC 接口为 DUT 管脚接口。

模拟测试仪器和环境：右下方面板模拟器件测试行为，包括两个测试仪器：

源测量单元 (SMU) 和 LCR 表。并且可以模拟测量环境：包括测量温度模拟，测量时间模拟（用于可靠性测试如 HCI, NBTI 等）及辐照剂量模拟（用于模拟器件在空间应用的相关特性）。

2.3.1.3 产品特性

- 使用真实工业数据进行教学：基于真实的工业器件数据，开展器件特性分析、建模与仿真实践，帮助教师和学生进行半导体教学。
- 综合全面：能够演示大多数最新的半导体器件类型（如 FinFET, 28nm CMOS, SOI, Bipolar, III/V 及无源器件），和典型电路例如环形振荡器和 SRAM。通过真实工业数据与实践，更有效地阐明器件物理及建模原理。
- 与时俱进及可拓展：内含最新器件类型（如 FinFET, GaN），模拟器可随未来行业技术发展进行同步更新。

2.3.1.4 应用示例

- 测试模式

模拟真实器件测量，学习器件物理和环境因素的影响，如图 15 所示。

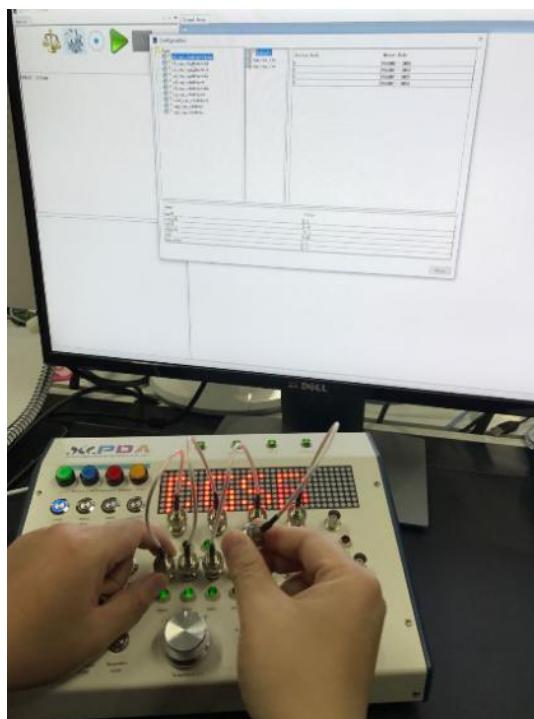


图 15 测量模式

- 建模模式

集成了 PDA 工业级建模软件 MeQLab™，交互式演示标准和高级的真实建模过程，包括 Corner 模型提取，工艺波动统计模型，低频噪声，可靠性建模及电路验证等，如图 16 所示。

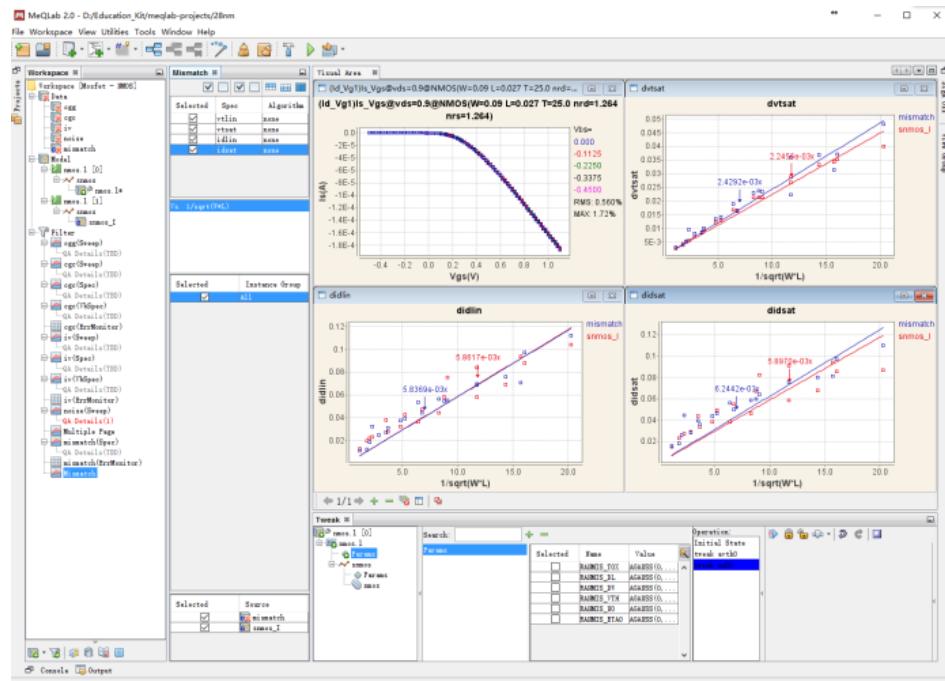


图 16 建模模式

● 教学模式

EELab 内置教学软件可帮助用户更有效地学习器件物理，基于工业质量数据及行业标准定义及做法，可快速将器件物理与真实的先进半导体器件特性关联起来，如图 17 所示。

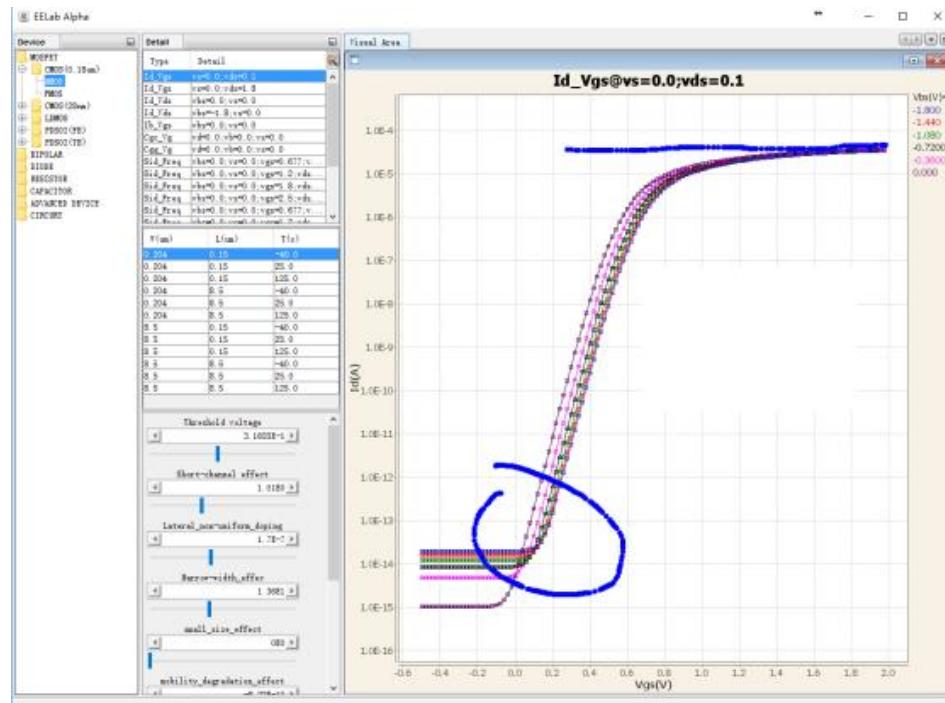


图 17 教学模式

● 数据模式

为用户提供工业级器件数据，方便用户完成后期各项教学、实验、科学研究

等工作，充分挖掘数据知识，如图 18 所示。

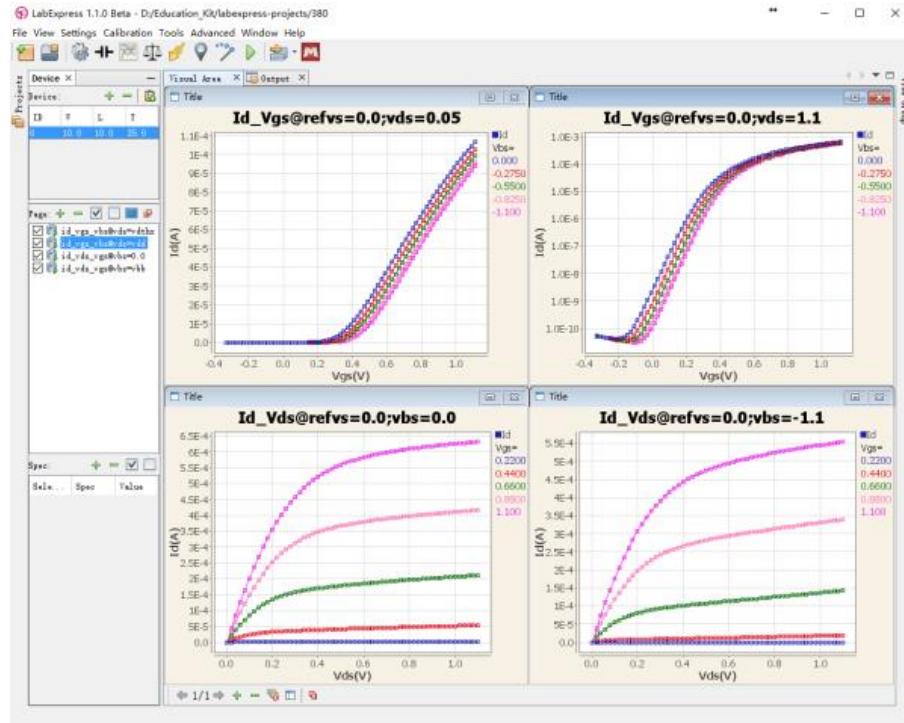


图 18 数据模式

2.3.2 14nm 集成电路工艺教学套件

微纳电子教学套件（工艺版）是博达微便携式微纳电子学工艺教学实验平台的一部分，该产品模拟先进工业半导体工艺技术，提供交互式的先进半导体单步工艺、器件制造工艺的仿真体验。

2.3.2.1 产品简介

半导体工艺已经进入 7nm FinFET 时代，然而相关教学材料（如教科书、课堂讲义和实验设备）却极大地落后于时代步伐，甚至其中一些教学素材仍然在使用 20 年前的内容。这使得学生所掌握的知识与实际半导体行业要求差距甚远。

微纳电子教学套件（工艺版）是一款基于“虚拟化”教学的创新型产品，适合于高校及其它教育机构，最大限度地减小教学与工业界的差距。涵盖现代半导体的主要单步工艺（清洗、氧化、淀积、光刻、刻蚀、离子注入、扩散和化学机械抛光等），模拟操作单步工艺的方法、材料以及设备参数的设定。涉及 MOSFET、FinFET、LDMOS 和 GaN 等多种半导体器件的制造工艺流程，包括制造流程中每步工艺的参数设定等实践操作。并支持工艺版 SEK 产品与器件版 SEK 产品的互连（通过 BNC 接口），实现对完成工艺制造流程器件的电学特性测量。该教学套件拥有人性化的图形交互界面，实验箱集成了可按键操作的液晶显示屏，模拟实际工艺设备的操作面板，强化工艺学习的实践性。微纳电子工艺教学套件（工艺版）

作为一款强大的教学和实验工具，可以应用于如下场景：

- 半导体工艺教学工具：用于仿真、图形化显示主要半导体单步工艺，例如：氧化、淀积、光刻、刻蚀和离子注入等单步工艺。
- 半导体工艺教学辅助演示：用于直观展示典型器件制造工艺流程，例如：MOSFET、FinFET 和 GaN 等器件。
- 半导体工艺实验教学工具：模拟半导体工艺设备的操作行为，可让学生体验现代半导体工艺制造流程和关键参数设定。

2.3.2.2 产品架构

微纳电子教学套件(工艺版)由 PE101™ 实验箱和 ProcessLab™ 软件包组成，如图 19 所示。



图 19 实验箱 – PE101™

单步工艺(Process)：对应实验箱面板左侧的 Single Process Selection 区域的按键，包括的单步工艺如表 11 所示：

表 11 单步工艺

按键名称	工艺名称
Clean	清洗
Oxidation	氧化
Deposit	淀积
Lithography	光刻
Etch	刻蚀
Ion Implantation	离子注入
Diffuse	扩散
CMP	化学机械抛光

器件制造(Device)：对应实验箱面板左侧的 Device Fabrication Selection 区域的按键，包括的典型器件：DIODE、BJT、RESISTOR、CAPACITOR、MOSFET、FINFET、

GaN、LDMOS。

器件测试(Test): 对应实验箱面板右侧下方的 PIN Information of Device Fabrication 区域，实现与器件版的连接。

2.3.2.3 产品特性

- 直观全面及实践性: 能够演示主要的半导体单步工艺的结构剖面图, 直观展示典型半导体器件的制造工艺流程, 实验箱液晶显示屏与参数设定按键配合使用, 可实现真实半导体工艺设备的模拟操作, 增强工艺教学的实践性。
- 与时俱进及可拓展性: 产品包含当前最新器件的制造工艺流程(如 FinFET、GaN 等), 预留 4 个定制按键用于用户特殊器件工艺的定制需求, 半导体工艺模拟器可以根据行业工艺技术的发展进行同步更新。

2.3.2.4 应用示例

- 单步工艺模式

模拟半导体器件制造中的单步工艺, 学习单步工艺如: 清洗、氧化、离子注入、刻蚀等的基本原理及其在器件中的作用, 图 20 单步模式。

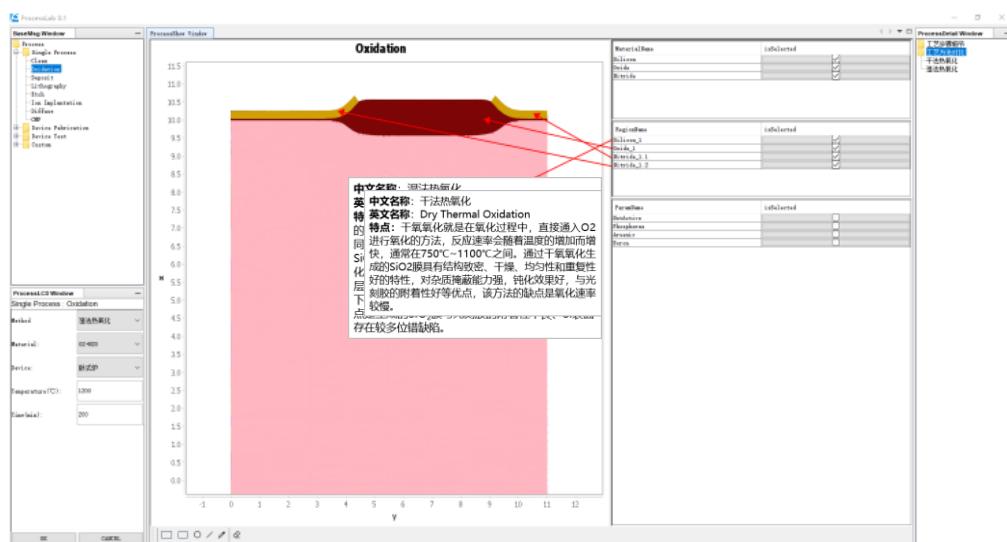


图 20 单步模式

- 器件制造模式

集成了 8 种器件的制造工艺流程, 交互式演示器件制造的多个工艺步骤过程, 支持工艺步骤参数的输入, 工艺仿真输出包括器件每一步工艺的结构剖面图、掺杂浓度等信息, 用户可以通过点选的方式学习器件的结构组成、掺杂浓度分布和关键工艺参数等, 如图 21 所示。

MOSFET制造教学

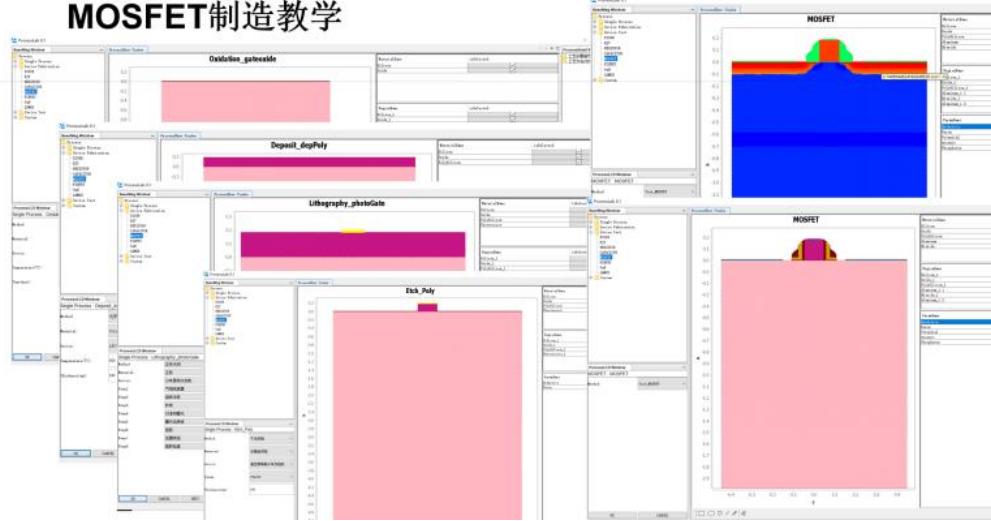


图 21 器件制造模式

● 器件测试模式

测试功能能够给出工艺仿真步骤完成的器件的 I-V 特性曲线，可快速将器件工艺特性与真实的先进半导体器件特性关联起来，如图 22 所示。

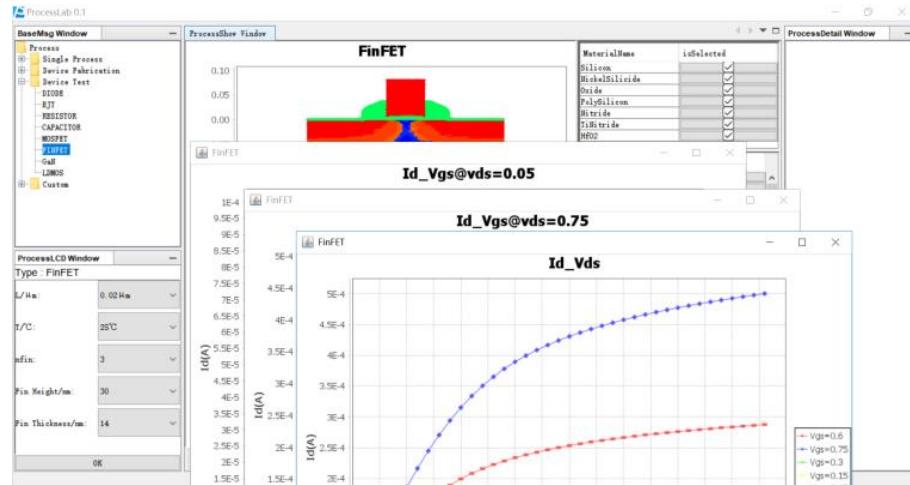


图 22 器件测试模式

2.3.3 7nm 集成电路虚拟现实（VR）实验室

器件教学套件和工艺教学套件为用户提供了一个学习 7nm 工业级“数据”的机会，而在当前高校教育中，还需要学生熟悉真实的工业“场景”，场景+数据的模式，让同学能够“知其然，知其所以然”，为此，我们建立了一个 7nm 集成电路虚拟现实（VR）实验室，重现真实的工业“场景”。

2.3.3.1 产品简介

“中兴事件”、“华为事件”相继爆发，中美贸易战旷日持久，集成电路对于国家综合国力的重要性不言而喻。当前集成电路高校教学重视理论，缺少实践机会，

与真实集成电路人才的需求脱节。出现这一现象的原因可以归结为三点：

- 集成电路发展迅速，根据“摩尔定律”，集成电路的集成度每两年就要翻一番，先进技术层出不穷，而学校还是沿用几年甚至十几年前的理论进行指导，即使有实践环境，也是很多年前的旧设备、旧工艺，与真实的集成电路制造脱节。
- 集成电路设备昂贵，相关设施在实验操作过程中（比如扎探针）容易损坏，工艺线要保证无尘和稳定，即使学校组织学生进行企业实践，企业也很难让学生进行真正意义的实践操作。
- 由于仪器设备成本高、占用空间大，因此，实训阶段需要的设备数量有限，学生无法做到人手一台设备；同时，实验设备复杂多样，实物实训具有很大的危险性，实验通常也需要很长的时间进行调试，这使得人员与设备的安全性无法保证。

为此，我们开发了 7nm 集成电路虚拟现实（VR）实验室，包含如下内容：

1. 工业级先进集成电路制造设备：如 300 毫米（12 英寸）半自动探针台、光刻机等。
2. 工业级先进设备使用过程模拟，包括：装晶圆、扎探针、工艺线操作、封装线操作等操作过程。
3. 先进工艺线全流程模拟：学生犹如置身于一个真实的工艺线中。
4. 先进封装线全流程模拟：学生犹如置身于一个真实的快封线中。
5. 先进测试线全流程模拟：学生犹如置身于一个真实的测试线中。

2.3.3.2 硬件部分

硬件包括如下部分，如图 23 所示：

- 高性能主机
- GPU: NVIDIA GeForce GTX 1060、CPU: Intel Core i5-4590, RAM: 8GB
- 虚拟现实头戴式设备
- 2160*1200（单眼 1080*1200）分辨率；90Hz 刷新率
- 虚拟现实操控手柄 x2
- 定位器
- 液晶显示器
- 鼠标
- 键盘



图 23 VR 实验室硬件列表

2.3.3.3 功能模块

1. 12 英寸虚拟探针台模块

虚拟测试工业场景，与 7nm 微纳电子器件教学套件配合使用，提供全套软硬件设施和实验教材，相关实验技能如下：

- 掌握集成电路 12 英寸晶圆的工业级测量方法
- 掌握集成电路典型器件（场效应晶体管、双极型晶体管、二极管、电阻、电容、变容器等）的工业级测量方法
- 掌握集成电路 300 毫米探针台的使用方法
- 相关知识点：晶圆（Wafer）、300 毫米探针台、Chuck、探针、控制器、晶圆地图、显微镜、扎探针。

学生将基础实验设备进行连接，并佩戴 VR 设备，VR 体验设备模拟出如图 24 所示的集成电路晶圆测试实验场景，学生根据步骤完成实验流程：





图 24 12 英寸虚拟探针台模块

2. 集成电路虚拟工艺线模块

虚拟工艺线工业场景，包含先进天车系统和 EUV 光刻机等 14nm 工艺线主流场景和设备，与 14nm 集成电路工艺教学套件配合使用，提供全套软硬件设施和实验教材。

3. 集成电路封测实验线模块

虚拟集成电路封测工业场景，完成封装测试过程，提供全套软硬件设施和实验教材。

2.4 线上资源平台

当前学生学习面临的学习问题主要包括：

- 由于集成电路知识门槛较高，常用的搜索引擎搜到有价值的东西的概率较低；
- 同时，我们发现，大量 IC 从业者需要“翻墙”去获取资源，大量优秀的集成电路资源在国外，但这与我们国家的互联网政策相违背。
- 即使能获得国外的大量资源，但由于很多从业者存在英文阅读障碍，很难有效的进行阅读和理解。

这就给我们一个启示，我们需要把平台做成一个资源汇集平台，结合我们核心技术（针对 IC 从业者的蛛网搜索引擎和大数据平台），为从业者打造一个资

源汇集平台。大数据平台每日进行大量集成电路独家视频、资源抓取，并进行知识图谱建设和分发。

全行业的用户会帮我们共同积累资源，所有用户搜索的内容，都会自动下放到我们的引擎中，并且，该引擎无国界限制，又可以通过二次过滤的策略滤掉国外非合规信息，形成干净整洁纯净的 IC 资源平台，这样，用户就会将这一产品成为一个 IC 领域必不可少的工具。

同时，我们自建的核心技术（识别 IC 词汇的语音识别和机器翻译引擎），能够有效的对 IC 内容进行翻译，解决用户的阅读障碍。该技术站在通用互联网技术的肩膀上，形成针对 IC 领域特有的翻译功能，比常规技术在 IC 领域的语音识别和机器翻译效果更佳，形成独特的技术壁垒。

在实现形式上，线上平台会分为网站端和移动端。

网站端用来满足用户长时间的学习需求，结合我们的 IC 知识图谱引擎，形成条理清晰的知识图谱化学习方式，如图 25 所示。

The screenshot shows the homepage of ICzhiku.com. At the top left is the logo 'IC智库' with the URL 'ICzhiku.com'. A search bar with the placeholder '搜你想要的知识 / 动态 / 从业者' is at the top right. On the left is a sidebar with a dark background and white text, listing categories: '芯片设计', '晶圆制造', '封装测试', '软件EDA', '设备材料', '人工智能', and '科技前沿'. To the right of the sidebar is a '知识体系' (Knowledge System) section with sub-links like '设计基础', '模拟电路设计', etc. Below this is a '推荐学习' (Recommended Learning) section with a list of books. To the far right is a large box titled '全集成电路产业级知识图谱' (Comprehensive IC Industry Knowledge Graph), which highlights a massive course system covering 7 major categories and over 10 million resources.

图 25 IC 智库网站端 (ICzhiku.com)

移动端用来满足用户的碎片化学习和社交需求，采用今日头条模式，结合我们的个性化推荐引擎，形成针对每个用户特有的个性化碎片学习和社交方式，如图 26 所示。



图 26 IC 智库移动端下载二维码 (IC 智库 App)

当这个产品成为大家一个必不可少的工具后，会引入强大的社交功能，变成IC界的“公开化微信”，与任何集成电路从业者实时沟通。

社交功能主要满足集成电路从业者间的社交需求，形成用户粘度，比如：可以实时与相关的IC从业者聊天，向其他从业者提问，可以有偿回答问题等，形成一种社交体系，从而固化日活(DAU)，达到最终吸引全部从业者的目地。

对于知识的需求者，这是一个集成电路学习平台：可以进行全集成电路知识图谱的学习；也是一个集成电路搜索平台：可以专注于集成电路问题和资源的搜索；同时，这还是一个集成电路提问平台：可以向数百万集成电路从业者进行提问。

对于知识的拥有者，这里能满足他们的物质需求：上传知识、回答问题会有现金收益；同时，能满足他们的精神需求：获得知识被认可、被尊重和传播的满足感。

现在已经入驻的大咖包括学术界、工业界、投资界产业链等集成电路行业翘楚近千人，图27是主要发起专家。



图27 IC智库主要发起专家一览

2.5 线上教学平台

在高校教育教学过程中，我们可以进行相关信息化建设，比如：教学网站建设、教学客户端建设、教学软件建设、实验平台建设、虚拟化教学（如虚拟仿真、虚拟现实，增强现实）的建设等内容。图28为我们提供的一站式微纳电子教育综合服务云平台，具体网址为：www.minisek.com。

对于实验类课程，我们可以进行实验课程的教学综合解决方案，如：课程管理、作业管理、学生管理、考试管理等，学生可以进行实验预习、实验指导书下载、提交实验报告、完成课后作业等内容。

一站式微纳电子教学实验综合服务云平台

The figure displays three screenshots of the Minisek cloud platform interface:

- Top Screenshot:** A landing page featuring a VR logo, a video player showing a 300mm probe station virtual lab, and a user login form.
- Middle Screenshot:** An assignment management screen titled "作业". It shows a list of experiments (Experiment 1 to Experiment 14) and a "课后作业" (Post-lab Assignment) section containing three questions about diode characteristics and I-V curves.
- Bottom Screenshot:** Another assignment management screen titled "作业". It shows a "视美学习" (Visual Learning) section with three video links for IC diodes and a "习题" (Exercise) section with two questions about diode characteristics and I-V curves.
- Bottom-most Screenshot:** A detailed view of a specific assignment titled "现代二极管器件建模及特性分析" (Modern Diode Device Modeling and Characteristic Analysis). It includes sections for "实验内容" (Experiment Content), "半导体器件建模实验" (Semiconductor Device Modeling Experiment), and a list of requirements.

图 28 一站式微纳电子教育综合服务云平台 (www.minisek.com)

2.6 教师师资培训

由于本建设方案具有很多新型设备，具有新颖的教学形式，所以，我们会提供完整的师资培训，让各位高校的教学老师能够有效地使用本方案进行教学，已经开展的师资培训如图 29 所示。



图 29 我司封国强老师为相关学校教师进行本方案教学培训

2.7 校企共建与企业师资补充

高校师资在高校教学方面具有优势，但同时，由于微电子（集成电路）是一门

与工业级紧密衔接的学科，需要高校在专业建设上更多的与工业界接轨。因为，校企共建与企业师资补充成为一个非常重要的手段，帮助学生更好的了解工业界一线进展。

当前，我们有充足的企业师资力量，主要师资均毕业于清华大学微电子所，并且在工业界有超过 10 年的一线微电子（集成电路）从业经验，如图 30 所示。



图 30 企业师资一览

在校企共建上，我们已经与多家高校建立了联合实验室，如图 31 所示。



图 31 校企共建实例

2.8 学生培训与就业推荐

针对高校微电子（集成电路）教学现状，毕业生输送到企业的质量和人数是考量一个高校微电子专业水平的一个重要指标，针对这一问题，我们为高校提供学生培训和就业服务，满足学生的就业需求。我们所采用的学生培训课程以工业界需求为主，与高校课程形成有效互补，如图 32 所示。

	课程讲解视频	PPT课件/课堂练习/课后作业	器件版教学套件	工艺版教学套件	VR教学套件	实验指导书/实验方案	EDA系统				
基础理论	集成电路常识	✓	✓					✓	✓	✓	
	集成电路发展史	✓	✓					✓	✓	✓	
	集成电路产业链	✓	✓					✓	✓	✓	
	集成电路国内外现状	✓	✓					✓	✓	✓	
	半导体材料及制备工艺	✓	✓					✓	✓	✓	
	半导体中的电子状态	✓	✓					✓	✓	✓	
	半导体中的缺陷、杂质与掺杂工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	半导体中的载流子浓度	✓	✓					✓	✓	✓	
	载流子的漂移运动	✓	✓					✓	✓	✓	
	载流子的扩散运动	✓	✓					✓	✓	✓	
	PN结内建电势差	✓	✓					✓	✓	✓	
	PN结空间电荷区的电场和宽度	✓	✓					✓	✓	✓	
	PN结载流子分布	✓	✓					✓	✓	✓	
	载流子的产生与复合	✓	✓					✓	✓	✓	
	过剩载流子性质与准费米能级	✓	✓					✓	✓	✓	
	二极管理想L_V特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	二极管基础知识	✓	✓					✓	✓	✓	
	芯片制造的沾污控制和清洗工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	芯片制造的氧化工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	芯片制造的CVD工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	芯片制造的光刻工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	芯片制造的刻蚀工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	芯片制造的金属化工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管制造工艺	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管制造实验	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	
	二极管产生、复合电流和大注入	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	二极管击穿电压	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	二极管电流电压特性	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管正向电流特性	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管反向电流特性	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管电容特性	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管噪声特性	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管等效电路	✓	✓					✓	✓	✓	
	二极管IV特性测量实验	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	二极管CV特性测量实验	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	工业级二极管的测量与分析	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	器件SPICE模型简介	✓	✓					✓	✓	✓	
	第一阶段作业答疑				✓	✓					
	CMOS集成电路概述	✓	✓					✓	✓	✓	
	MOS场效应原理	✓	✓					✓	✓	✓	
	MOS表面静电特性	✓	✓					✓	✓	✓	
	功函数差	✓	✓					✓	✓	✓	
	平带电压	✓	✓					✓	✓	✓	
	MOS阈值电压	✓	✓					✓	✓	✓	
	MOS栅电容理想C_V特性	✓	✓					✓	✓	✓	
	MOS栅电容非理想特性	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	半导体表面态	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	180nmNMOS电容特性测量实验	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	MOS理想电流电压关系	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
	MOS转移特性曲线	✓	✓		✓			✓	✓	✓	
基础实践	MOS输出特性曲线	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS衬底偏置效应	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	
	180nmNMOS衬偏特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	MOS亚阈值特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS沟道长度调制效应	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	180nm NMOS转移特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	180nm NMOS输出特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	180nmNMOS电容特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	180nmNMOS转移特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	180nmNMOS输出特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS按比例缩小理论	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS阈值电压的短窄沟效应	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS表面电导及迁移率	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS寄生电容	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS速度饱和效应	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS漏诱导势垒降低效应	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS的LDD和Vth调整工艺	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS阈值电压的影响因素	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS多晶硅栅工艺和栅泄漏电流	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS漏电流机理	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	180nmNMOS衬底电流测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS转移特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	28nmNMOS输出特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	28nmNMOS栅电流特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	28nmNMOS衬底电流特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	28nmNMOS电容特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	28nmNMOS噪声特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	统计/失配模型特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	28nmNMOS转移特性测量	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS输出特性测量	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS栅电流特性测量	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS衬底偏置特性测量	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS衬底电流测量	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS DIBL特性测量	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	28nmNMOS电容特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	FinFET工作原理和制造工艺	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET制造实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET转移特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET输出特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET衬底电流、栅电流及电容特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET转移特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET输出特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	FinFET Isub和Ig特性测量实验	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS频率限制特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	辐射导致的氧化层电荷和界面态	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	热载流子和负偏压不稳定性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	MOS器件SPICE模型简介	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	第二阶段作业答疑							✓	✓	✓	
	CMOS反相器直流特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	CMOS反相器开关特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	CMOS反相器功耗	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	CMOS反相器设计准则	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	静态存储器及其温度特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	晶体管阈值对SNM影响	✓	✓	✓				✓	✓	✓	
	环形振荡器及其温度特性	✓	✓	✓				✓	✓	✓	

		基础理论					基础实践					前沿实践与推荐就业				
		输出电容及迁移率的影响	✓	✓								MOSFET侧墙工艺实验	✓	✓	✓	✓
		SRAM存储器测量实验	✓	✓								MOSFET源漏注入工艺实验	✓	✓	✓	✓
		环形振荡器测量实验	✓	✓	✓							MOSFET后端工艺实验	✓	✓	✓	✓
		集成电路中的电阻	✓	✓	✓	✓						MOSFET栅氧化层厚度工艺浮动实验	✓	✓	✓	✓
		集成电路电阻制造实验	✓				✓					MOSFET沟道掺杂浓度工艺浮动实验	✓	✓	✓	✓
		半导体电阻基本特性	✓		✓							MeQLab建模软件实训	✓	✓	✓	
		半导体电阻温度特性	✓		✓							二极管器件建模实验	✓	✓		✓
		半导体电阻方块电阻和电压系数	✓		✓							双极晶体管器件建模实验	✓	✓	✓	
		半导体扩散电阻测量实验	✓		✓							半导体电阻建模实验	✓	✓	✓	
		集成电路中的电容	✓	✓	✓	✓						半导体电容建模实验	✓	✓	✓	
		单位电容和电压系数	✓		✓							MOS变容器件建模实验	✓	✓	✓	
		平行板电容及其温度特性	✓		✓							180nm NMOS建模实验	✓	✓	✓	
		MOS变容器件及其温度特性	✓		✓							28nm NMOS建模实验	✓	✓	✓	
		积累电容和单位电容	✓		✓							FinFET器件建模实验	✓	✓	✓	
		集成电路电容制造实验	✓			✓						PDSOI器件建模实验	✓	✓	✓	
		半导体电容器CV测量实验	✓		✓							FDSOI器件建模实验	✓	✓	✓	
		MOS变容器件CV特性测量实验	✓		✓							JFET转移特性	✓	✓		
		双极晶体管基础知识	✓		✓							JFET输出特性	✓	✓		
		双极集成电路工艺	✓	✓		✓						JFET栅电流特性	✓	✓		
		BJT理想I-V特性	✓	✓	✓							JFET电容特性	✓	✓		
		BJT输入/输出特性曲线	✓	✓	✓							TFT转移和输出特性	✓	✓	✓	
		BJT的EM方程	✓	✓								JFET转移特性测量实验	✓	✓	✓	
		BJT少子分布	✓	✓								JFET输出特性测量实验	✓	✓	✓	
		BJT电流增益	✓	✓								JFET栅电流特性测量实验	✓	✓	✓	
		BJT非理想效应	✓	✓	✓							TFT转移特性测量实验	✓	✓	✓	
		BJT混合π等效电路	✓	✓								TFT输出特性测量实验	✓	✓	✓	
		BJT截止频率	✓	✓								GaN转移和输出特性	✓	✓		
		BJT击穿电压	✓	✓								LDMOS转移特性	✓	✓		
		BJT的SPICE模型	✓	✓								LDMOS输出特性	✓	✓		
		双极晶体管输入特性	✓			✓						LDMOS电容特性	✓	✓		
		双极晶体管输出特性	✓			✓						GaN制造实验	✓		✓	✓
		双极晶体管制造实验	✓				✓					LDMOS制造实验	✓		✓	✓
		双极晶体管掺杂浓度工艺浮动实验	✓				✓					GaN转移特性测量实验	✓		✓	✓
		BJT输入特性测量实验	✓			✓						GaN输出特性测量实验	✓		✓	✓
		BJT输出特性测量实验	✓			✓						LDMOS转移特性测量实验	✓		✓	✓
		PDSOI转移和输出特性	✓			✓						LDMOS输出特性测量实验	✓		✓	✓
		FDSOI转移和输出特性	✓			✓						LDMOS电容特性测量实验	✓		✓	✓
		PDSOI转移特性测量实验	✓			✓						JFET器件建模实验	✓		✓	✓
		PDSOI输出特性测量实验	✓			✓						TFT器件建模实验	✓		✓	✓
		PDSOI栅电容测量实验	✓			✓						GaN器件建模实验	✓		✓	✓
		PDSOI沟道电容测量实验	✓			✓						LDMOS器件建模实验	✓		✓	✓
		FDSOI转移特性测量实验	✓			✓						TestKey及测量数据详解	✓	✓	✓	✓
		FDSOI输出特性测量实验	✓			✓						工艺波动下的器件建模实训	✓	✓	✓	✓
		半导体物理与二极管复习	✓	✓	✓	✓						PDK实例详解	✓	✓		
		MOS场效应管与三极管复习	✓	✓	✓	✓						设计规则检查实训	✓	✓		
		基础课程闭卷考试										版图与电路图一致性检查实训	✓	✓		
		IC设计流程詳解	✓	✓								寄生参数提取实训	✓	✓		
		设计软件实训	✓	✓								参数化单元设计实训	✓	✓		
		版图基础詳解	✓	✓								全定制IC设计、验证和后仿真实训	✓	✓		
		验证软件实训	✓	✓								实训课程项目考核		✓	✓	
		全定制IC设计实训	✓	✓								简历打磨和笔试技巧	✓	✓		
		MOSFET阱掺杂工艺实验	✓			✓						模拟笔试	✓	✓		
		MOSFET多晶硅栅工艺实验	✓			✓						面试技巧和模拟面试	✓	✓		
		MOSFET的Halo和LDD工艺实验	✓			✓										

图 32 学生培训课程体系

当前，我们已经在国内多所高校开展了学生培训和就业推荐，输出到国内一线知名企业（如长鑫存储），如图 33 所示。



图 33 学生培训与就业推荐

2.9 集成电路科普

除了高校的集成电路专业教育外，本方案还提供了集成电路科普方案，普惠更多人群。我们采用虚拟现实（VR）的方式，增加互动性，构建集成电路科普课程，抽丝剥茧，层层递进，科普集成电路知识。全部过程采用游戏闯关模式，让学生在游戏中学到知识，收获快乐，让集成电路的科普寓教于乐。在内容设置上，我们遵循真实互动感受，从手机实物入手，让学生身临其境，将手机拆解，逐步展示手机芯片的样貌，介绍封装概念，看到芯片内部布局，介绍工艺原理，器件结构，电路设计等内容。VR 设备由于是常用消费端设备，其质量和可靠性比一般

的科普展品强很多，能够反复使用，如图 34 所示。



图 34 集成电路科普

3 方案的效果和预期

3.1 教学与一线产业接轨，从 7nm 到 3nm

当前，高校微电子专业的一个较为重要的现象就是与一线产业界有些脱节，学校所使用的教学设施还相对陈旧。本方案的所有内容都来自于一线产业界，教学产品的研发节点已经到达 7nm，与当前产业主流集成电路制程一致。并且，5nm 节点的研发已经开启，可以进行从 7nm 到 5nm 的产品升级。基于 Gate-All-Around 结构的 3nm 研发已经在远期规划中。

3.2 加强信息化与云端化，打造下一代电教实验室

在方案设置上，我们突出先进信息化的教学理念，充分运用从一线产业界获取的真实场景和数据，并拥有多项核心技术，包括：互联网技术、人工智能技术、大数据技术、云计算计算和虚拟现实技术，提供更加信息化和云端化的教学理念。打造下一代智能微电子实验室，方案和理念包括：

- 线上加线下：结合互联网平台，进行先进的实验课程信息化体系建设和实验室信息化建设，校际资源共享；
- 实物加虚拟：实物（实验设备）和虚拟（VR/AR 虚拟，仿真教学设备）

- 各有侧重，发挥教与学的组合拳优势；
- 硬件积木化：最先进的基础模块和可选装的模块组合复用到更多课程，提高资源复用率，降低成本；
 - 软件国产化：啃下“华为事件”掐脖子的地方，从学校开始建立未来工业生态。

3.3 高校师资培训结合企业师资补充，促进高校师资的提升

通过 2.6 和 2.7 节的介绍，本方案为促进高校师资提升提供了有力的保障。如图 35 所示，一方面，所有线上资源平台和线上教学平台开放给高校教师，高校教师可以进行自学。另一方面，定期举办相关师资培训课，进一步提升高校师资水平。同时，企业师资的进入，有效弥补高校师资与产业一线情况存在脱节的问题。

线上资源平台（网站ICzhiku.com和移动端）

全集成电路产业级知识图谱课程体系，覆盖7大类28小类，1200门课程，视频量超过10万，相关资源（工具、文档、文章等）超过100万

芯片设计
晶圆制造
封装测试
软件EDA
装备材料
人工智能
科技前沿

移动端可以实现与IC行业百万从业者共同学习、问答和社交

学术界
工业界
投资界
产业链



扫码下载移动端APP

线上教学平台（一站式教育实验综合服务云平台）

www.minisek.com

教学网站

教学客户端

实验平台

课程管理

作业管理

学生管理

考试管理

实验预习

实验指导书

实验报告

课后作业

产业界师资体系和软硬件设施

30位超过十年经验的一线工程师，覆盖全部知识点



良好的设备厂商（硬件）和EDA厂商（软件）关系，共同进行打包建设

图 35 提升高校师资水平

3.4 中美贸易战中的集成电路问题，促进学科招生

中美贸易战、“华为事件”、“中兴事件”后，我国势必会在微电子（集成电路）专业建设上加大投入，将集成电路作为一级学科的说法也逐渐被广为流传。预计在未来几年内，高校的相关建设也会逐步加强，中学生对于集成电路的认知更深入，对国家的爱国情怀以及核心技术的建设更加投入，已经有多所高中开始针对集成电路进行了课程改革，图 36 为我司针对上海建平中学高中生进行微电子（集成电路）教育。



图 36 高中生开展微电子（集成电路）教育

3.5 提升学生就业率，打造“就业明星”

由于该方案中包含学生培训和就业模块，在学生完成高校基础课程后，学生会有相当长的时间进行一线工业界的教学和实践活动，可以有效的提高学生的综合实践能力，提升学生就业率。针对重点企业，我们都有长期的工业服务，可以推荐到相关优秀企业就业，打造“就业明星”，与我司有合作关系的重点企业如图 37 所示。



图 37 合作企业代表

3.6 形成校际资源共享

微电子和集成电路作为国家重点建设的学科，在国内各个高校高度重视，18年，教育部等六部门支持北京大学、清华大学等9所高校建设示范性微电子学院，如本项目按目标实现，可像其他兄弟院校进行推广，实现校际深度合作。同时，在高校内，可以向相关专业（如材料、电子信息工程等）推荐该模式，形成“跨越式共享”学科大基地，即“跨方向、跨专业、跨学科”的跨越式共享。今后随着项目的持续建设，我们将借助校园网络平台，进一步扩大共享范围，促进学科的交叉和融合。

3.7 形成社会资源共享

在高校教学推广的基础上，计划下一步将项目资源进行对外宣传，如通过省级精品课程网站、国家级精品资源共享课程等共享平台，向校外全方位、全天候开放。采用专人负责制，实现对外企业、院校、个人有偿或免费使用虚拟网络教学平台或虚拟仿真实验。同时，还可以联合教育机构，进行职业教育委培，为企业定向输入人才。

4 建设方案转化为国家虚拟仿真实验教学项目

该建设方案符合国家虚拟仿真实验教学项目要求，如高校需要，可以将方案的全部（或部分）转化为国家虚拟仿真实验教学项目，当前，已经有包括复旦大学在内的多所学校，采用将该方案转化为虚拟仿真实验教学项目，如图38所示。

The screenshot shows a news article from Tencent News. The title is '正在阅读: 86个项目! 2019年度上海市级虚拟仿真实验教学项目名单公示'. The main content is a table listing 86 projects. The table includes columns for project ID, name, content, responsible teacher, and category. Categories include Electronics Information and Surveying.

序号	项目名称	内容	负责人	类别
81	复旦大学	集成电路 12 英寸晶圆测试虚拟仿真实验	周鹏	电子信息类
82	东华大学	通信电子电路虚拟仿真实验	叶建芳	
83	华东师范大学	半导体器件的虚拟测试及电学参数提取分析虚拟仿真实验	石艳玲	
84	上海工程技术大学	轨道交通行车全过程控制及故障演练虚拟仿真实验	刘志钢	
85	上海海洋大学	近海无人机观测虚拟仿真实验	秦奎峰	测绘类
86	同济大学	地面激光扫描的数据采集与拼接虚拟仿真实验	吴杭彬	

Below the table, there is a note: '如对公布的事项持有异议，可在2019年10月10日之前向市教委高教处书面提出，并签署真实姓名。以单位名义提供意见的，必须署明单位名称并加盖公章。' There are also sharing icons and a location note: '地址：大沽路100号3303室'.

图38 相关院校采用本方案相关内容申请虚拟仿真实验教学项目网络截图

5 实施步骤

本项目方案的全部或部分可以分阶段部署，项目内容可以根据各个不同院校的特点做定制化安排，表 12 为某所高等院校实施部署本方案实例。

表 12 某高等院校实施部署本方案计划表

分期部署	第一期	第二期	第三期	第四期
课程体系	工业级半导体器件教学（48 学时） 工业级半导体器件测试实验课（80 学时）	工业及半导体器件模型和参数提取实验（56 学时） 微纳电子器件科研创新平台（自定学时） AI 与半导体创新平台（自定学时）	工业级半导体工艺实验（48 学时） 工业级半导体版图设计（36 学时） 工业级半导体 PDK 设计（36 学时）	高级器件测试实验课（80 学时） 高级工艺实验课（48 学时） 工业级半导体封装测试实验课（36 学时）
教学教具	7nm 微纳电子器件教学套件-50 套-基础模块和教学模块	7nm 微纳电子器件教学套件-50 套-模型和参数提取模块	14nm 集成电路工艺教学套件-50 套	7nm 集成电路虚拟现实（VR）实验室-50 套
线上资源平台	200 个 License	300 个 License	400 个 License	500 个 License
线上教学平台	2 个 License	3 个 License	4 个 License	5 个 License
师资培训	4 次 X 2 人	4 次 X 3 人	4 次 X 4 人	4 次 X 5 人
校企共建	企业授课 3 次	企业授课 10 次	企业授课 20 次	企业授课 40 次
学生培训	200 人次	300 人次	400 人次	500 人次
学生就业	推荐优秀学生至国内一线集成电路企业 5 人	推荐优秀学生至国内一线集成电路企业 10 人	推荐优秀学生至国内一线集成电路企业 20 人	推荐优秀学生至国内一线集成电路企业 40 人