

一、项目名称

高压大电流 IGBT 芯片关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：国家铁路局

提名意见：

绝缘栅双极晶体管（IGBT）芯片是控制电能传输、转换的“CPU”，其技术长期被国外封锁，国内应用市场主要依赖进口。作为传统产业转型升级和战略性新兴产业的核心基础部件，高压 IGBT 成为严重制约轨道交通、智能电网等高端装备技术与产业发展的主要瓶颈之一。

该项目全面攻克高压 IGBT 芯片设计与制造关键技术，基于国内首条 8 英寸 IGBT 芯片生产线开发成套工艺，研制完成 1700V-6500V 高压 IGBT 系列产品，成功应用于轨道交通、智能电网等高端装备领域，典型应用包括“高速动车组”、“大功率机车”、“地铁车辆”、“电力系统工程”等，并远销印度、俄罗斯和欧洲市场，销售 IGBT 超 20 万套，实现销售收入 40.4 亿元。获授权发明专利 57 项，发表论文 60 篇。“高压高功率密度 IGBT 芯片及其模块研究开发”与“轨道交通用 3300V 等级 IGBT 芯片研制及其应用”成果达到国际先进水平；曾获中国铁道学会科技进步特等奖、中国电源学会技术发明特等奖。

该项目发明打破国外垄断，实现国内高压 IGBT 技术“从无到有、从弱到强”、产品“从依赖进口到国产替代、开始批量出口”的战略跨越，支撑了中国高铁、智能电网等高端装备健康、可持续发展，引领了国内高压 IGBT 技术和相关应用产业的健康发展。

我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，各栏目填写符合国家科学技术奖励工作办公室的要求。该项目相关情况在我单位官网进行了公示，同时所有完成人所在单位也进行了公示，公示均无异议。

提名该项目为国家技术发明奖 二 等奖。

三、项目简介

绝缘栅双极晶体管（IGBT）是控制电能传输、转换的**核心芯片**，为轨道交通装备提供牵引动力，是实现列车高速、重载的基础。高铁用 IGBT 要满足我国轨道交通多气候、宽地域的运行环境和严酷的应用工况等可靠性要求，是业界巨大的挑战；此外，还需要以微米级的精细结构承受数千伏的高压、数千安的大电流，面临动态开关安全性差、损耗高、长期耐压稳定性差等一系列难题。高压 IGBT 技术仅为极少数几个国外公司所垄断，并长期对我国封锁，严重制约了轨道交通等高端装备技术的安全发展。

2009 年温家宝总理在视察株洲所时嘱托公司“要为国分忧,尽快攻克 IGBT 芯片技术,实现国产替代,支撑中国高铁产业可持续发展”。

该项目在国家 02 专项等科技计划的支持下,株洲中车时代电气和浙江大学密切合作,基础理论与工程设计相结合,经过 8 年的重点攻关,攻克了高性能**元胞设计、注入效率控制、终端结构**等高压 IGBT 关键技术及其工艺方法,突破了高耐压、低损耗、高鲁棒性与高可靠性的技术瓶颈,形成了自主、可控的高压 IGBT 技术体系,研制出**1700V-6500V 系列高压高电流密度 IGBT 产品**,通过在地铁、机车长期考核和批量应用,并推广到高铁与电网领域。主要发明点如下:

1) 独创 IGBT **“U”形元胞及其栅电阻结构**,提出元胞栅电阻的三维网格拓扑与电流分布模型,研发了基-射自对准和抗应力侧墙工艺及低阻硅化钛工艺技术,突破了高压大电流 IGBT 易闩锁、动态不均流的技术难题,提高了芯片电流能力与鲁棒性,4500V IGBT 电流关断能力和短路耐受能力分别超过国外同类产品 200%与 50%。

2) 提出了损耗**“盛模型”**,发明了芯片背面局部空穴注入效率控制、正面空穴**双重拦截**技术及高能质子注入工艺方法,解决了导通损耗与关断损耗难以协调的固有矛盾,大幅度降低关断损耗 30%,达到国际先进水平。

3) 首创**“环+区+P 总线”终端结构**及半绝缘多晶硅(SIP0S)钝化工艺方法,降低了 IGBT 关断过程中终端区载流子密度并优化了电场分布,提高了终端耐压稳定性,3300V IGBT 高温漏电从 5mA 降低至 0.8mA,最高结温从 125 °C 提高至 150°C,装备**“复兴号”**高铁 IGBT 牵引变流器通过严格的考核验证。

该项目获授权发明专利 57 项,发表论文 60 篇,锻造一支 **“IGBT 技术研发与产业化”**国家重点领域创新团队、建成**“新型功率半导体器件”**国家重点实验室,完成了高压 IGBT 技术**“从无到有、从弱到强”**、产品从**“依赖进口到国产替代、开始批量出口”**的战略跨越,销售 IGBT 超 20 万套,实现销售收入 40.4 亿元,因竞争迫使国外产品降价而实现间接效益超过 100 亿元。该项目整体技术达到**国际先进水平、部分指标国际领先**,获中国电源学会技术发明特等奖、中国铁道学会科技进步特等奖,推动了国内 IGBT 及其应用行业整体技术进步与可持续发展。

四、客观评价

1、与国外公司先进技术比较

该项目所述高压 IGBT 的结构、工艺与英飞凌、三菱、ABB 等国外同类产品（附件 2.2.14, 2.2.21）不同，具有鲜明的技术特征。从元胞结构、注入效率控制技术、终端技术等三个方面系统对比如下：

（1）元胞结构：该项目独创的 IGBT “U 形”元胞结构有别于国外公司采用的元胞结构，能够极大压缩空穴在 P 基区的路径，大幅度提高抗门锁能力，“U 形”元胞的源极区 N⁺ 采用自对准工艺，制造成本低。该项目首创元胞级栅电阻结构，提出元胞栅电阻的三维网格拓扑和元胞级电流分布模型，实现了元胞间栅极控制信号同步开关、元胞间电流均衡自适应能力，提高了芯片电流能力，扩展了芯片的安全工作区。元胞栅电阻经并联后对芯片栅电阻的贡献可以忽略，可以设计独立的芯片栅电阻来实现对芯片之间的均流控制。国外主流技术采用芯片级栅电阻结构来改善芯片之间的均流，没有涉及芯片内部并联元胞间的不均流问题。

（2）载流子注入效率控制技术：该项目发明了双重空穴拦截的电子注入增强、背面局部空穴注入效率控制技术，实现 IGBT 正面电子注入、背面空穴注入效率独立调节，在大幅度降低导通损耗的同时，关断损耗也得以降低。基于高能质子注入工艺的背面局部空穴注入效率控制技术在降低芯片关断损耗非常有效，未见相关报道，产品性能达到国外同类产品先进水平。

（3）终端结构：该项目提出 IGBT “环+区+P 总线”终端结构，降低了关断过程中终端区载流子密度并优化电场分布，抑制了过电压与动态雪崩发生，降低了高温漏电流并提高了终端耐压稳定性；“P 总线”与“环”工艺同步，不增加制造成本。国外同行普遍采用场环与场板相结合的复杂结构来实现高耐压。

2、科技成果鉴定意见

（1）2012 年 12 月 21 日，在湖南省科技厅组织的“轨道交通用 3300V 等级 IGBT 芯片研制及其应用”科技成果鉴定会上，由刘友梅、桂卫华、罗安、钱佩信等院士、专家组成的鉴定委员会的鉴定意见：该项目“提出高压 IGBT/FRD 芯片边缘“环+区”混合设计结构及制造工艺、提出 U 形槽发射极金属电极结构及其自对准工艺、提出独特的多晶硅氧化+等离子腐蚀工艺的多晶硅栅侧墙结构、提出 P 阱侧翼掺杂结构”。鉴定委员会一致认定“该项成果达到国际先进水平...填补国内高压大功率 IGBT 芯片技术的空白，并已在轨道交通实现批量应用。同意通过科技成果鉴定”。【附件 2.2.22】

（2）2013 年 12 月 27 日，在湖南省科技厅组织的“高压高功率密度 IGBT 芯片及其模块研究开发”科技成果鉴定会上，由刘友梅、李立涅、郑有焱、罗安等院士、专家组成的鉴定委员会的鉴定意见：该项目“首创栅极区悬浮 P+总线结构、首创高压高功率密度 IGBT 元胞级的串联栅电阻结构、首次采用扩散工艺实现双 N 缓冲层结构、

首次提出模块的新型垂直式电流环路结构...开发出新一代高功率密度 IGBT 产品”。鉴定委员会认为“该成果总体技术处于国际领先水平，一致同意通过科技成果鉴定”。【附件 2.2.23】

3、项目验收意见

(1) 2015 年 8 月 7 日，由郑敏政、滕敬信、马振宇、张兴、肖向锋等组成的国家科技重大(02)专项任务验收专家组，对株洲中车时代电气股份有限公司承担的“高速机车高压芯片、封装与模块技术研发及产业化”进行验收，“项目承担单位完成了任务合同书规定的研发内容...开展了高速机车高压 IGBT 基础技术的研究，开发了 10 种高压 IGBT 产品，建成了 IGBT 封装设计公共服务平台及检测试验平台。通过项目实施，建成了 IGBT 的产业化生产线。完成了任务合同书规定的各项指标.....专家组一致同意项目通过验收”。【附件 2.2.24】

(2) 2015 年 2 月 11 日，受国家工信部委托、湖南省经信委组织肖向锋、钱佩信、关白玉、刘忠立等专家组成的项目绩效评价小组，对株洲中车时代电气股份有限公司承担的“新型电力电子器件研发与产业化”项目进行验收。验收意见：“项目单位通过自主研发，掌握了轨道交通用 800A/3300V、1200A/3300V 高压 IGBT 模块的核心技术，经第三方检测，达到了合同规定的技术指标.....绩效评价结果为优秀”。【附件 2.2.25】

4、重要科技奖励

(1) “高压高功率密度 IGBT 芯片研发及其应用”获 2015 中国电源学会技术发明特等奖。【附件 2.2.26】

(2) “牵引传动用高压 IGBT 研究开发与应用推广”获 2014 中国铁道学会科学技术特等奖。【附件 2.2.27】

5、用户意见

(1) 轨道交通是高压 IGBT 最大用户，中车株洲电力机车有限公司等铁路行业用户认为：“作为机车牵引变流器核心部件，该 IGBT 损耗低，导热快，关断能力强，可靠性高”。【附件 2.2.29】

(2) 城市地铁是高压 IGBT 的重要用户，无锡地铁公司认为“作为牵引系统核心的高压 IGBT 运行稳定，损耗低，状态良好”。【附件 2.2.30】

(3) 国家电网公司旗下中电普瑞电力工程有限公司应用意见：“作为换流阀的核心的高压高电流密度的 IGBT 通过了严格的入厂检测和相关换流阀试验，导通损耗低，关断特性好，1500A/3300V 高压 IGBT 在世界上电压等级最高、输送容量最大的厦门±320 千伏双极柔性直流输电工程中获得成功应用，从 2015 年 12 月投入运行以来，运行安全可靠。”【附件 2.1.3】

6、中铁检验认证株洲牵引电气设备检验站有限公司检验报告

(1) 6500V IGBT 型式检验报告【附件 2.2.28】

五、应用情况

株洲中车时代电气股份有限公司基于前述各项发明，完成了高压 IGBT 芯片正面、终端和背面结构设计与仿真优化，在国内首条 8 英寸 IGBT 生产线上自主开发了以低温缓冲层、基-射自对准和抗应力侧墙、背面局部空穴注入效率控制技术为核心的 IGBT 成套工艺，通过结构与工艺的协同创新与迭代、优化，实现了高压、高功率密度 IGBT 芯片的定型、量产与系列化，配套自主高性能 FRD 芯片，开发了 2400A/1700V、1500A/3300V、1200A/4500V、750A/6500V 等系列高压 IGBT 模块，主要参数如表 6 所示。

表 6 中车高压 IGBT 主要参数 (@ T_{vjmax})

IGBT	导通压降 $V_{CE(SAT)}/V$	正向压降 V_F/V	开通能量 E_{ON}/mJ	关断能量 E_{OFF}/mJ	反向恢复能量 E_{REC}/mJ	最大结温 $T_{vjmax}/^{\circ}C$
2400A/1700V	2.50	2.10	820	1400	620	150
1500A/3300V	2.90	2.20	2100	4300	2900	150
1200A/4500V	3.00	2.70	4560	6250	3250	125
750A/6500V	3.90	2.90	6100	4100	4080	125

注：数据来自中车的产品数据手册 (<http://www.sbu.teg.cn/1279.html>)。

自主高压 IGBT，综合性能达到国际先进水平，满足了中国高速动车组、大功率机车、城市轨道交通、电力系统应用要求，2014 年 10 月和 2015 年 12 月分别在轨道交通（附件 2.1.2）和电力系统（附件 2.1.3）开始应用，2015 年元月开始批量供应（附件 1.2.1），并逐步推广到新能源、特种装备等领域。

轨道交通方面：1500A/3300V IGBT 模块批量应用在 7200kW、9600kW 大功率机车、城市轨道交通领域，累计装车 92093 只、计 920 余台（列），实现牵引变流器销售收入 36.88 亿元，最早装车应用的大功率机车安全运行里程超过 100 万公里，在“复兴”号高铁已完成地面考核和整车“环形线”考核试验，即将在成贵线上线运行；750A/6500V IGBT 模块已通过严格的地面试验，详见试验报告【附件 2.2.28】，在“和谐 D1B”得到应用推广，并装备中国标准动车组“复兴”号高铁；3300V IGBT 模块分别在上海、昆明、无锡等全国 20 余个城市获得批量应用推广。

电力系统应用方面：自 2015 年开始，1500A/3300V 高压 IGBT 模块通过国家电网公司北京中电普瑞电力工程有限公司的严格考核与对比测试，成为其高压 IGBT 合格供应方，1500A/3300V 高压 IGBT 模块在厦门柔性直流输电工程获得成功应用，并推广到苏南 UPFC 工程、鄂渝背靠背工程、江苏吴江 500kV 静止同步补偿器等工程，到 2018 年底累计实现销售 8 万余只，计 1.84 亿元。

产品出口方面：从 2016 年起到 2018 年，出口印度 Cropton Greaves Limited 公司

3200 余套 1700V 高压 IGBT 模块，用于新造交流传动电力机车 300 余台，实现销售收入 530 余万元；2017 年 11 月开始到 2018 年底分 6 次向俄罗斯 EVP 公司出口 1700V 高压 IGBT 芯片 24166 片，实现销售收入 15.7 万美元；目前芯片开始送样德国 Semikron、模块送样美国 Benshaw 公司进行验证。IGBT 芯片与模块出口虽然目前规模还比较小，但对中国 IGBT 产业来说却是一个重大的转折点和良好的开端，标志着中国 IGBT 产业已经开始参与国际市场竞争。

主要应用单位情况表：

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	株洲中车时代电气股份有限公司	高压 IGBT 关键技术	高压 IGBT 芯片及模块 10 万余只，轨道牵引变流器 1900 余台	2014 年 10 月至今	闫伟 15073362539
2	中车株洲电力机车有限公司	IGBT 牵引变流器	大功率机车、城市轨道交通车辆 920 余台（列）	2014 年 10 月至今	郑雄 18273381275
3	中电普瑞电力工程有限公司	3300V 高压 IGBT 模块	电力系统换流阀 10037 只模块	2015 年 1 月至今	王艳雪 13911250074
4	常州博瑞电力自动化设备有限公司	3300V 高压 IGBT 模块	苏南 UPFC、静止同步补偿器等 13690 只模块	2016 年 1 月至今	韩越 0519-88408178
5	全球能源互联网研究院有限公司	4500V 高压 IGBT 模块	电力系统装备 1630 只模块	2017 年 1 月至今	曲松 13574225292

6	印度 Cropton Greaves Limited	1700V 高压 IGBT 模块	高压 IGBT 模块 3200 余只装备交 流机车 300 余台	2016 年 1 月至 今	刘明亮 18173322030
7	俄罗斯 EVP	高压 IGBT 芯片	高压 IGBT 模块， 24000 余片	2017 年 11 月 至今	雷云 15073303116

六、主要知识产权和标准规范等目录

- 1.发明专利：一种功率半导体芯片及其制备方法，专利编号：201310259232.4
- 2.发明专利：IGBT 芯片及其制备方法，专利编号：201410414533.4
- 3.发明专利：一种绝缘栅双极晶体管及其制备方法，专利编号：201510760569.2
- 4.发明专利：一种沟槽 MOS 结构肖特基二极管及其制备方法，专利编号：201110287378.0
- 5.发明专利：一种平面栅型 IGBT 芯片制作方法，专利编号：201210521271.2
- 6.发明专利：一种具有可调节电势分布的半导体装置及其制备方法，专利编号：201210237780.2
- 7.发明专利：一种平面栅型 IGBT 芯片，专利编号：201210521043.5
- 8.发明专利：基于 IGBT 分步淀积半绝缘多晶硅方法及 IGBT 终端结构，专利编号：201510711308.1
- 9.发明专利：一种集成了温度和电流传感功能的 IGBT 芯片，专利编号：201210355878.8
- 10.发明专利：一种逆导 IGBT 的制备方法，专利编号：201510740775.7

七、主要完成人情况

1. 刘国友：株洲中车时代电气股份有限公司教授级高级工程师，作为项目的负责人，主持高压 IGBT 研究开发，负责制定芯片设计及工艺总体技术方案；主持 IGBT 芯片结构设计及其关键工艺试验。对该项目技术发明点 1-3 都做出了创新性的贡献。

2、盛况：浙江大学教授，负责 IGBT 芯片及其封装基础理论研究，提出了 IGBT 动静态解析模型，完成高压 IGBT 芯片导通损耗、开关损耗建模及设计仿真，为高压 IGBT 芯片设计特别是导通损耗与关断损耗的优化提供解决方案。对项目技术发明点 1-3 做出了创造性贡献。

3. 罗海辉：株洲中车时代电气股份有限公司教授级高级工程师，完成高压高电流密度 IGBT 理论研究，负责 IGBT 芯片关键技术的研究，突破 IGBT 芯片参数均匀性的提升，并主持 IGBT 芯片制造工艺研究与开发。对技术发明点 1-4 有创造性贡献。

4. 覃荣震：株洲中车时代电气股份有限公司高级工程师，完成高压高电流密度 IGBT 理论研究，负责完成高压 IGBT 芯片结构设计，从结构上设计上提升 IGBT 芯片

必须具备的高功率容量、低功耗及宽安全工作区等特性。对项目技术发明点 1-3 做出了创造性贡献。

5. 黄建伟：株洲中车时代电气股份有限公司教授级高级工程师，负责高压高功率密度 IGBT 理论与芯片设计，完成高压 IGBT 芯片关键工艺技术研究、工艺流程的整合与优化，提高了芯片工艺的均匀性、稳定性及成品率。对项目技术发明点 1-3 有创造性贡献。

6. 肖海波：株洲中车时代电气股份有限公司工程师，完成高压高电流密度 IGBT 产品实现，负责完成高压 IGBT/FRD 芯片流程和工艺实现，改善了导通损耗与关断损耗矛盾、解决了终端高应力等问题，实现低功耗及宽安全工作区等特性。对项目技术发明点 1、3 做出了创造性贡献。

八、完成人合作关系说明

2008 年 10 月，株洲中车时代电气并购英国 Dynex。2008 年底公司委派我与谭兴进赴英国 Dynex 分别负责技术与市场营销工作。2009 年开始我参与了 Dynex 公司 IGBT 4 英寸线技术改造，并升级到 6 英寸线，即便如此，因基础薄弱，IGBT 仍然无法满足中国轨道交通应用需要，面临一系列高压与应用可靠性的问题。2010 年春节前，鉴于当时 Dynex 公司 IGBT 技术现状（二代，4 英寸 NPT 工艺）及与国际先进水平的（四代，6 英寸 SPT 工艺）差异，我向时代电气建议创建英国功率半导体研发中心，并很快得到公司批复。2010 年 5 月功率半导体研发中心在英国林肯成立，面向新一代高压 IGBT 前沿、共性技术研究开发，并为国内 IGBT 芯片产业化进行工艺开发与人才培养。

作为英国研发中心创始人，本人开始着手组织技术及管理团队从事 IGBT 的技术研发与产业化。作为第一批国内派驻的工程师，罗海辉、覃荣震、黄建伟等多名工程师 2010 年 10 月来到英国从事 IGBT 技术研究，覃荣震侧重于芯片设计，罗海辉负责等离子刻蚀等关键技术研究，黄建伟负责工艺开发与流程控制。在国家科技部 02 专项支持下，与国内团队一起负责高压 IGBT 关键技术与 8 英寸 IGBT 工艺开发。以功率半导体研发中心为平台，追赶国际先进水平的脚步不断加快，多项关键技术陆续实现突破，并逐步形成了自己的特色，在此基础上开发出了 1700V-6500V 系列产品，并在轨道交通领域得到应用验证。

2010 年下半年，时代电气联合浙江大学等单位申报国家 02 专项-高速机车高压芯片、封装与模块研发及产业化，并于 2011 年元月开始启动。浙江大学与时代电气等单位在高压 IGBT 芯片技术与封装等方面开展了全面的合作，浙江大学盛况教授等在 IGBT 芯片极限特性等方面开展了深入的理论探索，为高压 IGBT 芯片导通损耗与关断损耗的优化设计指明了方向。

2012 年，考虑到国内高铁、智能电网等高端装备对 IGBT 巨大的市场需求以及高端 IGBT 受制于人的严酷现实，时代电气决定举公司之力、利用后发优势实现弯道超车。时代电气成立 IGBT 产业化建设项目指挥部，作为项目副总指挥与技术总负责人，我主持项目技术路线、工艺布局和设备选型等工作及核心团队培养，组织林肯（罗海辉、覃荣震、黄建伟等）与株洲（肖海波、谭灿健、潘昭海等）两个技术团队协同工作，林肯团队负责 IGBT 芯片设计与开发，株洲团队负责生产线的建设，肖海波、谭灿健等负责 8 英寸工艺开发。2014 年 6 月 20 日，在团队集体的努力和辛劳付出下，国内首只 8 英寸 IGBT 晶圆顺利下线，并且受到海内外产业界与学术界高度关注，真正意义上拥有了自主、安全、可控的高压 IGBT 成套技术，并率先进入 8 英寸高压 IGBT 工艺时代。如今，基于国内 8 英寸 IGBT 线的系列化高压 IGBT 产品已广泛应用于机车、地铁、电力系统等众多领域并着手开始向更多应用行业推广。

本项目涉及到的所有发明、创新和配套工艺都是基于功率半导体研发中心、8 英寸 IGBT 芯片生产线和新型功率半导体器件国家重点实验室和浙江大学电气工程学院这些平台完成的，申报了 100 余项专利，具有完整的技术体系和知识产权。由本人及罗海辉、覃荣震、黄建伟、肖海波、谭灿健、潘昭海、张泉等共同合作完成的“高压高功率密度 IGBT 芯片及其模块研究开发”与“轨道交通用 3300V 等级 IGBT 芯片研制及其应用”达到国际先进水平，曾获中国铁道学会科技进步特等奖、中国电源学会技术发明特等奖。