

国家自然科学基金在集成电路领域近十年 资助状况与趋势分析

唐华¹, 施阁², 何杰¹, 刘克¹

(1. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085; 2. 中国计量大学, 浙江杭州 310018)

摘要: 集成电路技术作为信息科技的核心, 不仅是经济发展的基石, 更关乎国家安全和战略竞争地位。国家自然科学基金委支持我国集成电路领域基础研究, 逐渐形成了多层次科学基金资助体系。本文分析了近十年(2014—2023)“集成电路设计”(F0402)与“集成电路器件、制造与封装”(F0406)代码下各类型项目的研究方向、资助项目数量、经费等情况, 旨在通过对历年资助项目研究方向的分析, 了解我国集成电路研究的热点及研究特点, 探讨集成电路研究领域未来研究发展趋势, 为科研院所、高校及企事业单位了解该领域的研究热点、未来发展方向及路径提供借鉴。

关键词: 国家自然科学基金; 集成电路领域; 资助格局; 研究方向与热点

中图分类号: TN4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)02-0678-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20240105

Overview of the Funding Status and Trends of NSFC Projects in the Field of Integrated Circuits During the Past Decade

TANG Hua¹, SHI Ge², HE Jie¹, LIU Ke¹

(1. National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China;

2. China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: As the core of information technology, integrated circuit technology is not only the cornerstone of economic development, but also related to national security and strategic competitive position. The National Natural Science Foundation of China has supported China's foundation research in the field of integrated circuits, gradually forming a multi-level science foundation funding system. This article analyzes the research directions, funding project quantities, and funding conditions of various types of projects under the codes of "integrated circuit design" (F0402) and "integrated circuit devices, manufacturing and packaging" (F0406) in the past decade (2014—2023). Through the analysis of the research directions of funded projects over the years, we can understand the changes in research hot topics in China's integrated circuit field. The purpose of this article is to explore the funding characteristics of the integrated circuit field in recent years, and to provide a reference for researchers in domestic research institutes, enterprises and institutions to understand the research hot topics, future development directions and paths in this field.

Key words: natural science foundation of China; integrated circuit; status of funding; research topics and hot topics

1 引言

集成电路是信息科技的核心领域之一, 在国际竞争环境中的重要性愈发凸显。国家自然科学基金委(以下简称基金委)支持我国集成电路领域基础研究, 逐渐形成了多层次科学基金资助体系, 有力推动科研范式变革^[1]。同时, 基金委信息科学部通过积极组织各类学

术论坛与成果交流会等, 探索和研讨我国集成电路领域发展路径。2018年5月, 基金委信息科学部举办了“后摩尔时代微电子新器件技术研究——集成电路芯片研制的相关基础问题”研讨会, 分析了我国集成电路产业的发展现状, 指出我国集成电路产业的发展困境及未来发展方向, 提出需要加强集成电路的基础研究。通过对集成电路前沿工艺和后摩尔时代器件技术未来

发展趋势的分析,从基础研究角度给出了支持微电子技术发展的建议. 2018年9月,为推动我国微电子器件基础研究,促进集成电路技术的发展,培养微电子创新研究队伍,基金委启动集成电路3~5纳米节点器件基础问题研究应急管理项目,发布了“集成电路3~5纳米节点器件基础问题研究”应急管理项目指南. 2019年8月,基金委面向芯片自主发展的国家重大战略需求,以芯片的基础问题为核心,启动了“后摩尔时代新器件基础研究”重大研究计划项目并发布了指南,旨在发展后摩尔时代新器件和计算架构,突破芯片算力瓶颈,促进我国芯片研究水平的提升,推动我国在芯片领域的科技创新. 2021年9月,为推动我国集成电路电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)基础研究,促进集成电路技术发展,培养创新研究队伍,基金委信息科学部设立了“模拟集成电路敏捷设计方法与关键技术”专项项目^[2]. 2023年11月,为了加强未来集成电路基础理论和关键技术的基础研究,牵引系统性演进布局,培养集成电路领域创新人才及研究队伍,基金委信息科学部发布了“未来集成电路新理论与技术基础研究”专项项目. 信息科学部将继续重点推进“十四五”期间优先发展领域——“多功能与高性能集成电路”领域面向国家重大需求的原创性基础研究工作.

2 集成电路领域研究方向概述

目前,基金委信息四处涉及集成电路的学科代码是 F04“半导体科学与信息器件”,其中相关的主要是

F0402“集成电路设计”和F0406“集成电路器件、制造与封装”两个二级代码.

如图1所示,F0402二级代码基本涵盖了集成电路设计过程的全流程. 从集成电路设计类型分,主要包括“多核/系统芯片设计方法”“模拟、混合信号、射频集成电路设计”和“新功能、新结构芯片”方向等. 再从“低功耗、高效集成电路设计”和“器件、电路、系统协同设计”方向进行集成电路设计整体性能优化. 而开展集成电路设计过程所需的仿真平台工具的研究主要是在“集成电路设计自动化”(EDA)方向与“器件、微纳集成系统建模与验证”. 完成集成电路的功能设计后,需要研究集成电路结构形式和保护电路的设计,主要包括了“三维集成电路与集成系统”和“集成电路硬件安全”等研究方向. 进一步需要考虑集成电路流片后如何对电路的功能性能进行测试和验证,设计“集成电路的验证和测试方法”并在电路中预留测试接口电路. 结合制造工艺,集成电路设计同时需开展“集成电路的可测性、可靠性、可制造性设计”的研究. 除此之外,还有一些其他研究方向的研究.

集成电路的另一研究方向是F0406,也是目前集成电路发展中的主要瓶颈,该代码下包括了集成电路制造、封装、测试. 芯片的生产需要“集成电路制造的专用设备”的研制来支撑,也离不开材料方面开展“集成电路制造与封装材料”的研究. 设备和材料是“集成电路制造先进工艺技术”的研究基础. 在不同工艺条件下研究“微纳电子器件与集成”,开展“新型互连技术”和“同

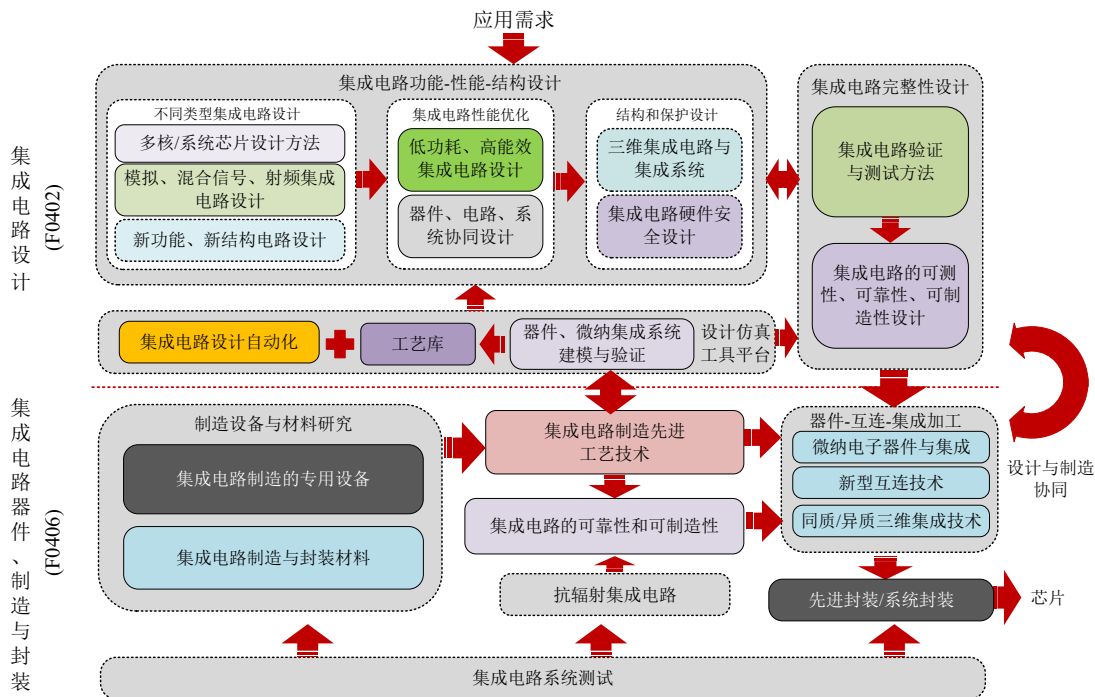


图1 F04代码下集成电路领域研究方向关系

质/异质三维集成技术”研究将各个器件进行互连形成集成系统,集成电路的制造过程中还需开展“集成电路的可靠性与可制造性”研究,针对空间辐射环境,还需开展“抗辐射集成电路”的加固技术的研究.加工完成的集成电路进行封装,需要开展“先进封装/系统封装”的研究.整个流程中都涉及“集成电路系统测试”,最终成为芯片产品.

3 集成电路领域资助情况分析

通过分析信息四处在集成电路领域的面上项目、青年科学基金项目(简称青年项目)、地区科学基金项目(简称地区项目)、重点项目、重大项目、重大研究计划、“集成电路3~5纳米节点器件基础问题研究”应急管理项目以及“模拟集成电路敏捷设计方法与关键技术”专项项目、“未来集成电路新理论与技术基础研究”专项项目、国家重大科研仪器研制项目、创新研究群体项目的资助和执行情况,可以了解我国目前集成电路领域各研究方向的发展情况.

2014—2023年,F04代码下集成电路领域的上述各类型项目共资助了850项,资助经费达53 054万元.在获资助项目数量和资助经费的研究方向分布中,首先是“模拟、混合信号、射频集成电路设计”研究方向,资助项目201项,经费达12 684万;其次为“低功耗、高能

效集成电路设计”研究方向,资助项目103项,经费达7 283万.资助项目数和经费最少的是“集成电路系统测试”方向,共3项,共资助108万元,其次是“器件、微纳集成系统建模与验证”研究方向,共7项,共资助295万元.

3.1 面上项目资助情况分析

2014—2023年,信息四处共资助集成电路领域面上项目364项,资助经费总额达21 874万元.面上项目各研究方向的资助项目数量和经费总额具体情况如表1所示.

由表1可见,集成电路领域面上项目各研究方向资助的情况呈不平衡状态,F0402的资助项目数量和经费额度约为F0406的2.6倍,资助量约占整体资助量的72%.由于集成电路制造领域的专业性、保密性、研究条件、产业结合度和资金需求等因素,该领域的项目选题和申请存在一定的限制,因而立项项目较少.

图2显示了F04代码下集成电路面上项目各研究方向的经费和数量占比情况.从资助经费上看,最多的三个方向分别是:“模拟、混合信号、射频集成电路设计”,“低功耗、高效集成电路设计”和“集成电路硬件安全”,占比分别为22.27%、15.99%和6.69%.由此可见,目前资助项目主要方向为模拟混合和射频类集成电路的设计,而且研究人员更加关注的是集成电路的

表1 2014—2023年F0402、F0406代码的面上项目研究方向情况

代码	研究方向	资助项数	经费总额/万元
F0402	模拟、混合信号、射频集成电路设计	82	4 872
	低功耗、高效集成电路设计	56	3 497
	集成电路硬件安全	24	1 464
	多核/系统芯片设计方法	25	1 424
	三维集成电路与集成系统	21	1 256
	集成电路的可测性、可靠性、可制造性设计	17	1 063
	集成电路设计自动化	16	1 004
	器件、电路、系统协同设计	9	513
	集成电路的验证和测试方法	6	377
	新功能、新结构芯片	5	329
	器件、微纳集成系统建模与验证	4	227
	F0406	集成电路制造先进工艺技术	21
新型互连技术		14	845
抗辐射集成电路		14	839
集成电路的可靠性与可制造性		12	756
微纳电子器件与集成		10	640
集成电路制造与封装材料		11	600
先进封装/系统封装		8	433
同质/异质三维集成技术		4	234
集成电路制造的专用设备		4	213
集成电路系统测试		1	48
	总计	364	21 874

功耗与能效和硬件安全等性能. 与近年来物联网、无线传感网、5G/6G 通讯等应用场景的芯片需求激增相关.

资助经费相对较少的三个方向为:“集成电路系统测试”、“集成电路制造的专用设备”和“器件、微纳集成系统建模与验证”,占比分别为 0.22%、0.97% 和 1.04%。“集成电路制造的专用设备”和“器件、微纳集成系统建模与验证”都需要有芯片装备或者芯片制造商的平台或者器件工艺库的支撑,而“集成电路系统测试”是集成电路产业链最后环节,工程技术问题相对较多,前沿科学问题相对较少,因此申报的项目数量也相对较少.

从数量上看,面上项目获得资助较多的三个方向及其占比情况:“模拟、混合信号、射频集成电路设计”占 22.53%;“低功耗、高效率集成电路设计”占 15.38%;“多核/系统芯片设计方法”占 6.87%. 获得资助较少的三个方向及其占比情况:“集成电路系统测试”占 0.27%;“同质/异质三维集成技术”占 1.10%;“器件、微纳集成系统建模与验证”占 1.10%. 从数量上来,资助方向大体与资助经费分布一致,有变化的是“多核/系统芯片设计方法”项目数量,这与目前人工智能、大数据等对计算算力需求的增长有关,即通过多核和系统架构的优化实现算力的突破. 而资助相对较少的“同质/异质三维集成技术”方向是在 F0406 代码下,其与 F0402

的“三维集成电路与集成系统”相关度较大,“三维集成电路与集成系统”面向设计,“同质/异质三维集成技术”面向集成电路制造. 从“三维集成电路与集成系统”立项数量多于“同质/异质三维集成技术”上看,三维集成技术目前还集中在设计阶段,在制造阶段的三维集成技术研究较少.

3.2 青年基金项目资助情况分析

2014—2023 年,信息四处共资助集成电路领域青年基金项目 402 项,经费总额达 10 220 万元. 青年项目各研究方向的资助项目数量和经费总额具体情况如表 2 所示.

由表 2 可见,青年项目与面上项目相比占比差别不大,但是项目数量和经费额度不同. 个别研究方向的占比变化较大,如面上项目“低功耗、高效率集成电路设计”与“模拟、混合信号、射频集成电路设计”的比例大概是 3:4,但是在青年项目里其比例为 2:5. 这与青年项目科研人员目前聚焦在集成电路功能层面有关,而承担面上项目的科研人员由于具备一定的科研基础,更多关注集成电路的功耗、能效等性能研究. 值得注意的是,在面上项目里占比较低的“新功能、新结构芯片”,在青年项目里占比却明显增高. 这与青年科研人员的思维活跃、善于创新的特点吻合,也是集成电路领域新赛道发展的生力军.

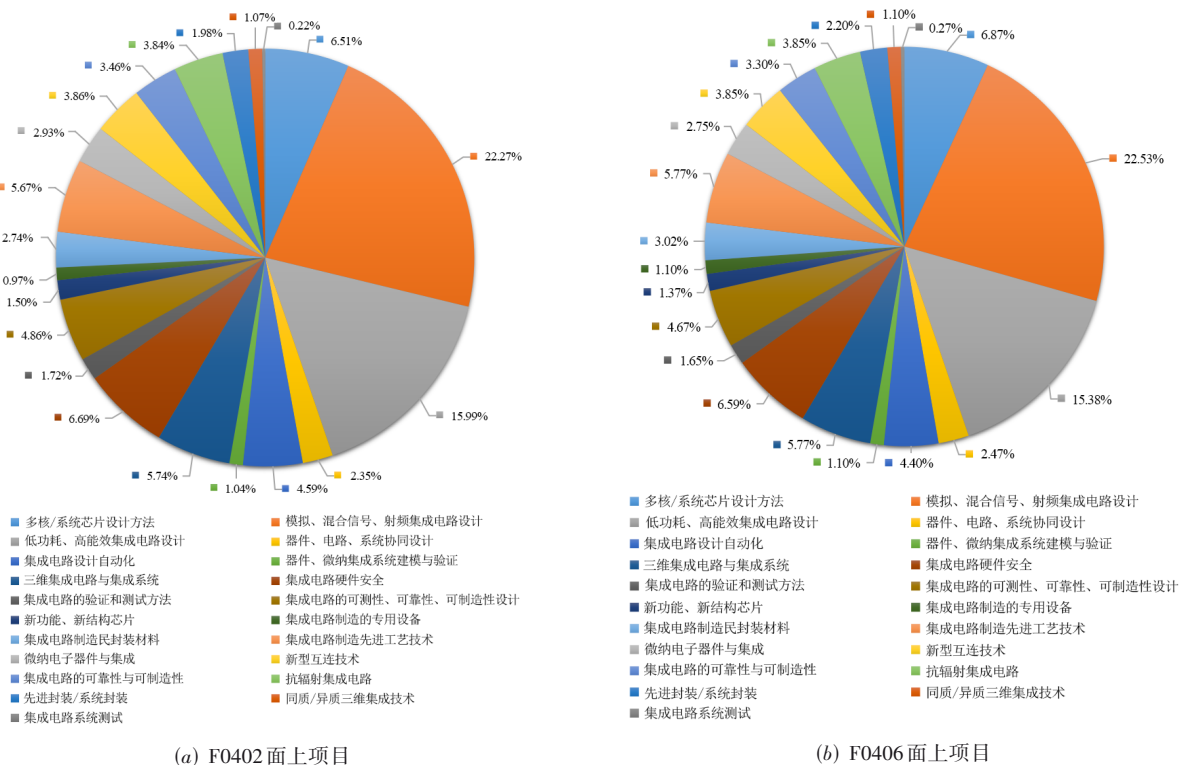


图 2 2014—2023 年 F0402、F0406 面上项目各研究方向经费和数量占比情况

表2 2014—2023年F0402、F0406青年基金项目研究方向情况

代码	研究方向	资助项数	经费总额/万元
F0402	模拟、混合信号、射频集成电路设计	107	2 699
	低功耗、高效集成电路设计	39	970
	多核/系统芯片设计方法	31	806
	新功能、新结构芯片	18	480
	集成电路硬件安全	16	405
	三维集成电路与集成系统	15	373
	集成电路设计自动化	14	364
	集成电路的可测性、可靠性、可制造性设计	8	197
	器件、电路、系统协同设计	7	182
	集成电路的验证和测试方法	5	116
	器件、微纳集成系统建模与验证	3	68
	F0406	集成电路制造先进工艺技术	25
集成电路制造与封装材料		22	604
微纳电子器件与集成		21	501
新型互连技术		18	494
抗辐射集成电路		19	492
集成电路制造的专用设备		11	274
集成电路的可靠性与可制造性		11	258
先进封装/系统封装		7	183
同质/异质三维集成技术		3	90
集成电路系统测试		2	60
	总计	402	10 220

图3显示了F04代码下集成电路青年项目各研究方向经费和数量占比情况。由于青年项目的资助经费基本上是定额资助,因而占比较为相近。从资助经费和数量分析,青年项目获得资助较多的三个方向经费及数量占比为:“模拟、混合信号、射频集成电路设计”,资助经费占26.41%,资助数量占26.62%;“低功耗、高效集成电路设计”,资助经费占9.49%,资助数量占9.70%;“多核/系统芯片设计方法”,资助经费占7.89%,资助数量占7.71%。较面上项目,除了“低功耗、高效集成电路设计”所占比例有所下降外,其余各项占比基本一致。

从资助经费和数量分析,获得资助较少的三个方向经费及数量占比为:“集成电路系统测试”,资助经费占0.59%,资助数量占0.50%;“器件、微纳集成系统建模与验证”,资助经费占0.67%,资助数量占0.75%;“同质/异质三维集成技术”,资助经费占0.88%,资助数量占0.75%。“器件、微纳集成系统建模与验证”和“同质/异质三维集成技术”两个方向,与面上项目类似,均需要芯片代工制造商的工艺支撑,青年研究人员参与度相对较低。“集成电路系统测试”与面上项目类型相同,申报的项目也相对较少。

3.3 地区基金项目资助情况分析

2014—2023年,信息四处共资助集成电路领域地

区项目共16项,经费总额为573万元。地区项目各研究方向的资助项目数量和经费总额具体情况如表3所示。

由于地区项目只资助特定区域,项目主要为区域创新体系建设与经济、社会发展服务,培养和扶植该地区的科学技术人员,稳定和凝聚优秀人才。项目体量较小,该研究领域还不能完全覆盖集成电路领域的F0402和F0406的所有研究方向。

3.4 重点项目、重大项目资助情况分析

重点项目是支持科研人员针对已有较好基础的研究方向或学科生长点开展深入、系统的创新性研究,其目的是促进学科发展,推动若干重要领域或科学前沿取得突破。2014—2023年,信息四处共资助集成电路领域重点项目29项,经费总额为8 467万元,平均资助强度约290万/项。重点项目资助项目数量和经费总额具体情况如表4所示。

由于重点项目是主要围绕国家需求在特定的领域进行申请和立项资助。属于“命题式”指南引导类项目。项目须根据指南进行申请,从立项项目上看,近十年来,集成电路设计领域的重点项目的设立主要支持的是“模拟、混合信号、射频集成电路设计”和“多核/系统芯片设计方法”两个方向,这与近十年来物联网、智能感知、人工智能领域飞速发展相关,也体现了这两个方向与产业的紧耦合关系。另外,在重点项目中“集成电

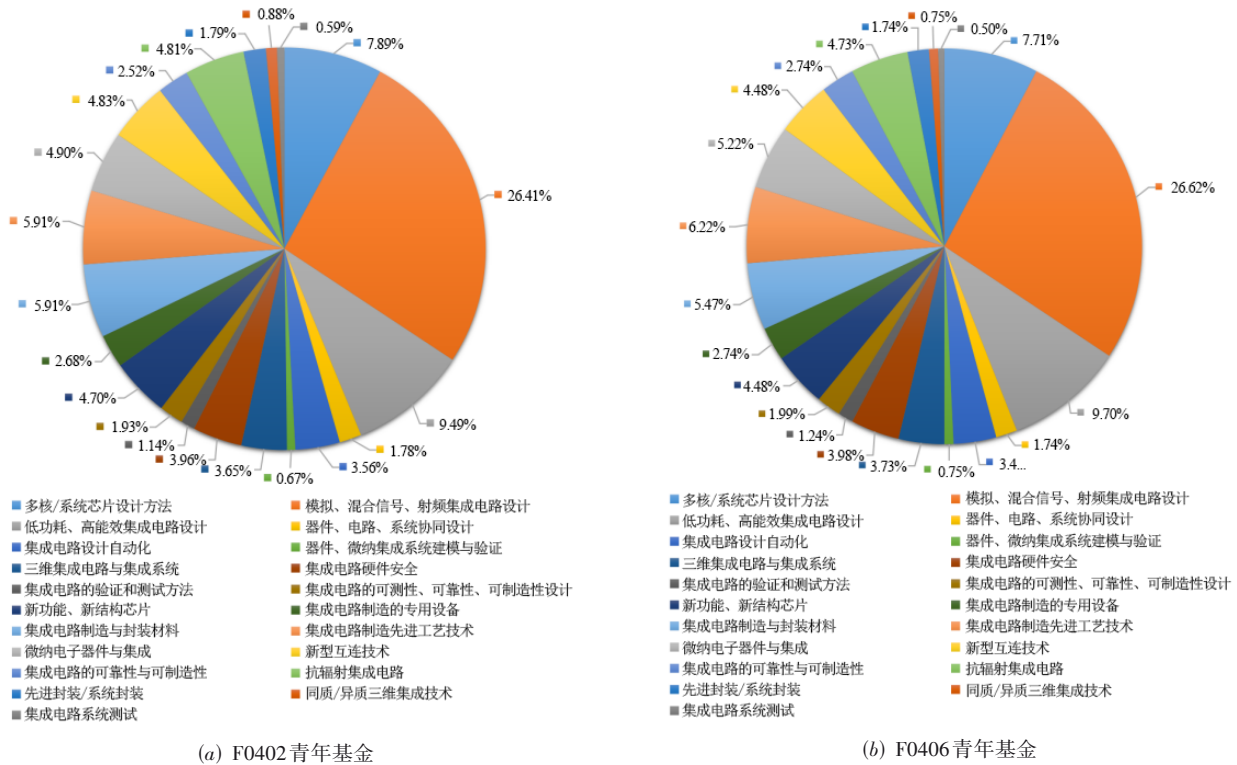


图3 2014—2023年 F0402、F0406青年基金各方向经费和数量占比情况

表3 2014—2023年 F0402、F0406地区基金项目研究方向情况

代码	研究方向	资助项数	经费总额/万元
F0402	低功耗、高效集成电路设计	3	101
	器件、电路、系统协同设计	2	77
	模拟、混合信号、射频集成电路设计	2	66
	集成电路的可测性、可靠性、可制造性设计	1	37
F0406	三维集成电路与集成系统	1	35
	先进封装/系统封装	2	75
	集成电路制造的专用设备	2	66
	微纳电子器件与集成	1	39
	集成电路制造先进工艺技术	1	42
	集成电路制造与封装材料	1	35
	总计	16	573

路设计自动化”和“器件、电路、系统协同设计”都是集成电路EDA领域相关的研究方向,在国产EDA软件的工具链还不完全的情况下,基金委积极布局EDA领域的重点项目和专项项目,近十年国产EDA软件取得了长足的进步。

图4显示了F0402、F0406重点项目各研究方向经费和数量占比情况。从资助经费上看,重点项目获得资助较多的两个方向是:“模拟、混合信号、射频集成电路设计”资助经费占26.54%，“多核/系统芯片设计方法”，资助经费占14.60%。获得资助较少的两个方向及占比

是:“抗辐射集成电路”资助经费占4.28%，“新功能、新结构芯片”，资助经费占5.57%。

从数量上看,重点项目资助最多的是“模拟、混合信号、射频集成电路设计”，资助数量占27.59%。资助最少的是“抗辐射集成电路”，资助数量占3.45%。

2014—2023年,F04代码下共资助集成电路领域重大项目共1个,下设4个课题。研究方向均为“模拟、混合信号、射频集成电路设计”，经费总额为1800万元。具体项目与课题情况如表5所示。该重大项目针对传统高速射频模数转换器架构和电路所面临的性能、功

表 4 2014—2023 年 F0402、F0406 重点项目研究方向情况

代码	研究方向	资助项数	经费/万元
F0402	模拟、混合信号、射频集成电路设计	8	2 247
	多核/系统芯片设计方法	4	1 236
	低功耗、高效集成电路设计	3	915
	集成电路设计自动化	3	902
	器件、电路、系统协同设计	3	885
	集成电路硬件安全	3	863
	三维集成电路与集成系统	2	585
	新功能、新结构芯片	2	472
F0406	抗辐射集成电路	1	362
	总计	29	8 467

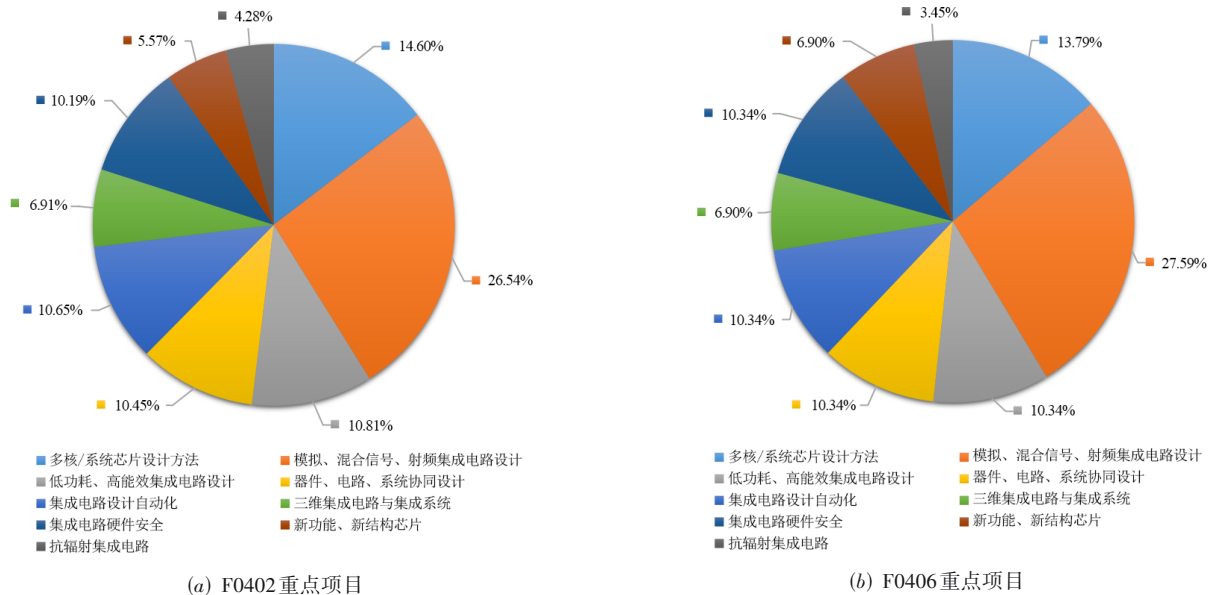


图 4 2014—2023 年 F0402、F0406 重点项目各方向经费和数量占比情况

耗设计瓶颈,基于自主可控国内纳米级 CMOS 集成电路工艺,开展近阈值低功耗模拟电路及高速模数转换器、高效新型数字化高速射频模数转换器架构和电路、高度可重构高速模数转换器架构和电路技术、超高速射频模数转换器架构和电路技术等方面研究. 高速射频模数转换器可广泛应用于无线基站通信、软件无线电、精密仪器测量、新一代大数据采集等系统.

3.5 应急管理项目、重大研究计划、专项项目情况分析

随着未来集成电路工艺节点推进到 3~5 nm,功耗问题越来越成为制约集成电路发展的瓶颈. 以新材料、新结构和新原理为主要特征的超低功耗微电子器件技术,可提供集成电路发展的新途径. 2018 年 9 月基金委启动“集成电路 3~5 纳米节点器件基础问题研究”应急

表 5 2014—2023 年 F0402、F0406 重大项目情况

项目名称	依托单位	资助类型	经费/万元
高速射频模数转换器新架构和电路技术研究	西安电子科技大学	重大项目	1 800
纳米级近阈值混合信号电路及高速模数转换器	电子科技大学	重大项目课题	350
高效新型数字化高速射频模数转换器架构和电路	清华大学	重大项目课题	350
高度可重构高速射频模数转换器架构和电路技术	西安电子科技大学	重大项目课题	600
超高速射频模数转换器架构和电路技术的研究	同济大学	重大项目课题	500

管理项目。项目直接经费的平均资助强度为 300 万元,“集成电路 3~5 纳米节点器件基础问题研究”应急管理项目共资助 6 项,方向为“微纳电子器件与集成”,从立项项目的信息可见,主要从异质集成技术、阻变存储

器、超高速非易失存储器、亚阈值摆幅器件和二维半导体光电子器件几个方面开展面向未来集成电路 3~5 纳米工艺节点器件的研究。经费总额为 1 800 万元。具体项目名称和项目依托单位等信息如表 6 所示。

表 6 2014—2023 年 F0402、F0406 应急管理项目情况

项目名称	依托单位	资助类型	经费/万元
基于外延层转印技术的新型 InAs/Si 2D-3D 量子阱隧穿晶体管	西安电子科技大学	应急管理项目	300
晶圆级单晶薄膜智能剥离与转移硅基异质集成技术研究	中国科学院上海微系统与信息技术研究所	应急管理项目	300
存算融合的新型模拟型阻变器件及其集成研究	清华大学	应急管理项目	300
局域场调制超高速非易失存储器与集成	复旦大学	应急管理项目	300
新型混合机制超陡亚阈值摆幅器件研究	北京大学	应急管理项目	300
新型二维半导体材料及其光电子器件的硅基集成	国家纳米科学中心	应急管理项目	300

2019 年启动的“后摩尔时代新器件基础研究”重大研究计划(简称后摩尔重大研究计划),主要是面向我国产业发展的战略需求,针对后摩尔时代芯片发展中最本质的算力瓶颈问题,希望紧密围绕 CMOS 器件能耗边界及突破机理、突破硅基速度极限的器件机制和超越经典冯·诺依曼架构能效的机制这三个核心科学问题展开研究。其目标是突破芯片算力瓶颈,提升我国在后摩尔时代器件方面的创新能力。目前已资助的研究项目类别主要包括:培育项目、重点支持项目和集成项目。“后摩尔时代新器件基础研究”重大研究计划资助集成电路领域项目 16 项,其中重点支持项目 8 项、培育项目 7 项、集成项目 1 项。经费总额为 4 453 万元。重大研究计划项目研究方向资助项目数量和经费总额具体情况如表 7 所示。

表 7 2014—2023 年 F0402、F0406 重大研究计划项目研究方向情况

代码	研究方向	资助项数	经费总额/万元
F0402	低功耗、高能效集成电路设计	2	1 800
	多核/系统芯片设计方法	3	680
	新功能、新结构芯片	4	534
	三维集成电路与集成系统	1	300
F0406	微纳电子器件与集成	4	759
	集成电路制造先进工艺技术	1	300
	新型互连技术	1	80
	总计	16	4 453

由表 7 可见,由于培育项目每项经费约为 80 万元左右,重点支持项目经费约为 300 万元左右,而集成项目为 1 500 万元。项目数量与经费不成比例。例如,“低功耗、高能效集成电路设计”方向中有 1 项北京大学承担的集成项目“事件驱动型超低功耗智能物联网芯片”,因此,所占经费比例是最高的。由此可见,随着智能感知和物联网技术的应用需求不断增加,低功耗、高性能的智能物联网芯片研发将会助推物联网产业的飞

速发展,未来将在智能感知、边缘计算、人工智能等应用领域有很好的应用。

另外,由于后摩尔重大研究计划瞄准的是后摩尔时代新器件,因此,“微纳电子器件与集成”方向的项目相对较多。针对后摩尔重大研究计划中的第三个核心科学问题:超越经典冯·诺依曼架构,开展的“多核/系统芯片设计方法”与“新功能、新结构芯片”方向开展的项目也较多。

图 5 显示了 F0402、F0406 后摩尔重大研究计划各研究方向经费和数量占比情况。项目数量与经费比例不同。从资助经费上看,后摩尔重大研究计划获得较多资助的分别是:“低功耗、高能效集成电路设计”,资助经费占 40.42%;“多核/系统芯片设计方法”,资助经费占 15.27%。获得资助较少的是:“新型互连技术”,资助经费占 1.80%和“三维集成电路与集成系统”,资助经费占 6.74%。

从数量上看,后摩尔重大研究计划基金项目均较少,其中,“新功能、新结构芯片”和“微纳电子器件与集成”各资助了 4 项,“多核/系统芯片设计方法”资助了 3 项,“低功耗、高能效集成电路设计”资助了 2 项,“集成电路制造先进工艺技术”“三维集成电路与集成系统”和“新型互连技术”各资助了 1 项。其他一些与集成电路密切相关的项目填报了其他代码(如 F0404、F0408 等),未统计在内。

2021 年 9 月,基金委信息科学部设立“模拟集成电路敏捷设计方法与关键技术”专项项目。为提升模拟集成电路设计的自动化和智能化程度,建立模拟集成电路从性能指标到电路网表的自动设计、电路模型自动建立、版图自动生成、寄生参数提取及后仿真加速的新方法,提高模拟集成电路自动化设计和分析的效率,形成从性能指标到电路网表的自动设计、版图自动生成到寄生参数提取的工具软件原型。如表 8 所示,“模拟集成电路敏捷设计方法与关键技术”专项项目共立项 13 项。其中重点支持项目 3 项,培育项目 10 项。重点支持项目

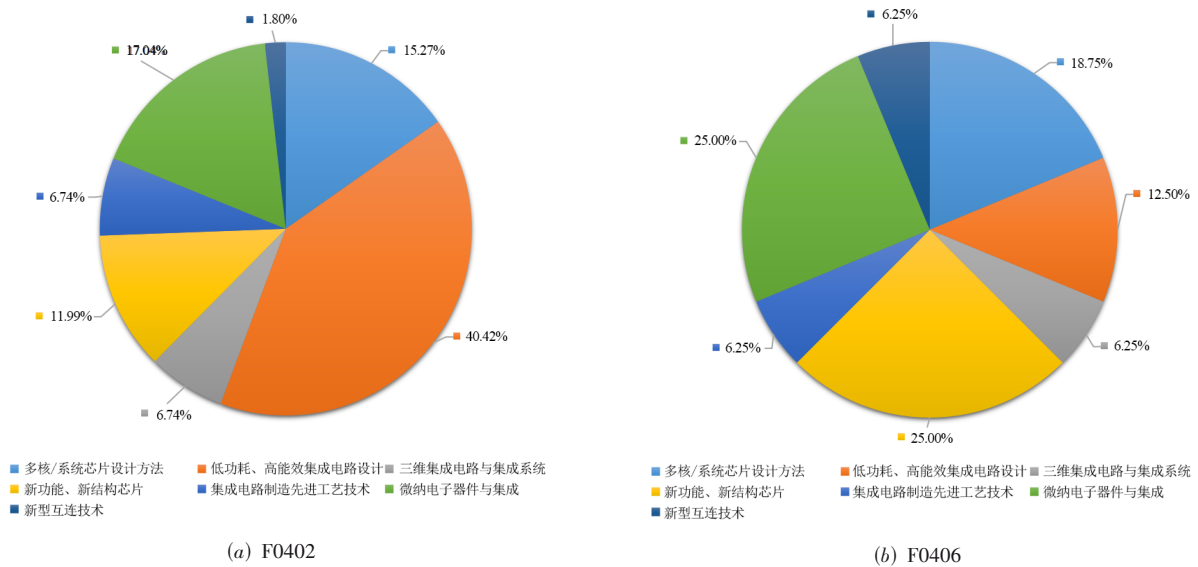


图5 2014—2023年F0402、F0406后摩尔各研究方向经费和数量占比情况

表8 模拟集成电路敏捷设计与关键技术专项项目情况

项目名称	依托单位	项目类型	经费/万元
性能指标驱动的纳米尺度模拟集成电路网表智能优化设计	复旦大学	重点支持项目	250
面向模拟集成电路敏捷设计的版图融合自动编译系统	北京大学	重点支持项目	250
模拟集成电路高效高精度建模与仿真技术研究	杭州电子科技大学	重点支持项目	250
面向雷达系统模拟集成电路的自动化网表综合	北京邮电大学	培育项目	50
基于模式追踪的多导体传输线($N \geq 2$)宽带表征技术研究	上海交通大学	培育项目	50
基于专家知识辅助的模拟集成电路原理图及版图敏捷设计方法	南京大学	培育项目	50
基于机器学习的多约束模拟集成电路版图自动生成方法研究	中国科学技术大学	培育项目	50
模拟集成电路网表自动生成原理图算法及并行优化研究	南开大学	培育项目	50
基于机器学习的模拟集成电路多PVT条件性能建模方法研究	复旦大学	培育项目	50
面向模拟集成电路版图寄生参数快速提取方法研究及工具开发	北京航空航天大学	培育项目	50
模拟集成电路系统级建模方法研究	中国科学院自动化研究所	培育项目	50
可重构电源管理芯片敏捷设计方法研究	上海交通大学	培育项目	50
基于指数积分的模拟电路后仿真加速技术研究	南方科技大学	培育项目	50

直接经费平均资助强度为250万元/项,培育项目直接经费平均资助强度为50万元/项,均为“集成电路设计自动化”方向,经费总额为1250万元。不过从项目阶段成果来看,目前与国产EDA厂家的平台接入工作还不足。

2023年11月,为了加强未来集成电路基础理论和关键技术的基础研究,牵引系统性演进布局,培养集成电路领域创新人才及研究队伍,基金委信息科学部发布了“未来集成电路新理论与技术基础研究”专项项目。前期,信息科学部组织了第312期“纳光电子与光子芯片:物理与应用”和第347期“集成电路未来发展及关键问题”两个双清论坛,并通过指南论证、专家函询等环节,最终形成了专项的指南。希望通过未来集成电路新理论和技术基础研究的理论创新,在先进器件及集成工艺、模拟与混合电

路、电路设计方法、新型计算架构等方向取得原创性的技术突破,为建设芯片强国奠定坚实基础。专项围绕“工艺-器件-电路-架构-工具-系统”完整产业链,共设立了5个资助方向:CMOS兼容的硅光器件、接口及硅基三维集成工艺;硅基毫米波数字化多波束相控阵芯片关键技术;面向复杂数字电路的逻辑智能化全自动生成方法;面向器件-芯片-系统全链条的协同设计理论与方法;面向具身智能及类脑智能大模型的新型计算架构。资助项目7项,经费总额为2000万元。本专项受到集成电路领域相关科研院所、高校及企事业单位的广泛关注和踊跃申报。共收到申请项目53项,经过初筛,共受理项目47项。依托单位共28家。申报项目最多前三家依托单位情况:清华大学6项,浙江大学4项,北京航空航天大学4项。合作单位共42家,

其中高校 22 家,科研院所 11 家,企业 9 家:上海集成电路研发中心有限公司、长江先进存储产业创新中心有限责任公司、上海概伦电子股份有限公司等龙头企业、国有新

型研发机构、行业独角兽企业,可见本专项项目团队与集成电路产业紧密结合。“未来集成电路新理论与技术基础研究”专项立项项目如表 9 所示。

表 9 未来集成电路新理论与技术基础研究专项项目情况

项目名称	依托单位	项目类型	经费/万元
CMOS 兼容的高带宽密度硅光接口及集成技术研究	上海交通大学	专项项目	288
CMOS 兼容的硅光器件、接口及硅基集成工艺研究	中国科学院上海微系统与信息技术研究所	专项项目	283
硅基毫米波数字化多波束双频三模可重构相控阵芯片系统	天津大学	专项项目	285
二维半导体-硅基单片集成逻辑芯片研究	南京大学	专项项目	286
面向复杂数字电路的逻辑智能化全自动生成方法	中国科学院计算技术研究所	专项项目	286
面向多模态大模型的三维超异构存内计算芯片研究	北京大学	专项项目	291
面向大模型加速的存算一体超异构计算系统研究	武汉大学	专项项目	281

3.6 重大科研仪器研制项目、创新研究群体项目情况分析

国家重大科研仪器研制项目是面向科学前沿和国家需求,以科学目标为导向,资助对促进科学发展、探索自然规律和开拓研究领域具有重要作用的原创性科研仪器与核心部件的研制,以提升我国的原始创新能力。2014—2023 年在 F0402 和 F0406 两个代码下资助的国家重大科研仪器研制项目共 2 个,其中“集成电路制造的专用设备”方向资助项目 1 项,即“纳米集成电路边缘缺陷测试分析仪研制项目”。该项目针对纳米工艺下

尺寸的减小导致芯片缺陷多样性增加问题,通过开发科学仪器设备核心技术和关键部件,研究出新的边缘缺陷测试理论和测试方法,研制出集成电路边缘缺陷测试分析仪,经费总额为 755 万元。“集成电路的验证和测试方法”方向资助项目 1 项,即“超高速模数转换器集成电路测试验证系统”。该项目主要解决超高速 A/D 转换器静态参数和频域参数测试难题,采用频谱特性分离、干扰和抖动注入、内置自测试等测试验证方法指导超高速 A/D 转换器设计,形成测试环节和设计环节的协同验证技术,经费总额为 862 万元。具体项目情况如表 10 所示。

表 10 2014—2023 年 F0402、F0406 代码下集成电路领域国家重大仪器项目情况

项目名称	依托单位	资助类型	经费/万元
纳米集成电路边缘缺陷测试分析仪研制	合肥工业大学	国家重大科研仪器研制项目	755
超高速模数转换器集成电路测试验证系统	西安电子科技大学	国家重大科研仪器研制项目	862

国家重大科研仪器研制项目目前支持的项目较少。与集成电路产业链中所缺少的重大关键科研仪器装备的需求不匹配。这与基金委项目支持的经费体量和集成电路产业仪器装备所需投入的差距有关,在重大科研仪器领域可以探索产业界与基金委联合支持模式。提高整体支持强度实现集成电路产业链中关键重大科研仪器装备的国产替代。

创新研究群体项目是支持优秀中青年科学家成为学术带头人和研究骨干,共同围绕一个重要研究方向合作开展创新研究,培养和造就在国际科学前沿占有一席之地研究群体。2014—2023 年在 F0402 和 F0406 代码下,资助的创新研究群体项目共 1 项。项目名称是“高效模拟前端集成电路和集成系统”,依托单位是西安电子科技大学。研究方向属于“模拟、混合信号、射频集成电路设计”。该项目针对超高速光传输、超宽带雷达对抗等应用研究模拟前端集成电路,采用 SiGe 化合物半导体的实现更高带宽射频前端采样保持,并采用多通道交织采样的方法,实现更高采样速度。另外,采

用硅通孔的堆叠实现系统集成,提高集成度。

从集成电路设计、制造、封测等产业链角度看,目前获得群体资助的项目非常少,特别是制造和封测环节还没有获得资助的创新群体。这与集成电路的主要工程属性有关,在创新群体方面可以探索关键核心工程技术的特别资助,提升集成电路设计、制造、封测等环节的核心技术能力和人才培养水平。

国家自然科学基金委员会也在其他类别项目(如联合基金和基础科学中心等)对集成电路领域进行了支持。另外,其他申请代码和其他科学部也有较多集成电路领域相关的项目,由于统计原因本文未涉及。

4 总结与展望

本文总结分析了近十年(2014—2023) F0402 与 F0406 代码下各类型项目的研究方向、资助项目数量、经费等情况,以及自然科学基金委信息科学部近年来对集成电路领域的资助布局情况,信息科学部也将持续重点推进“十四五”期间优先发展领域——“多功能

与高效能集成电路”领域的研究. 希望可以为国内科研院所、企事业单位的研究人员了解该领域的研究现状和发展趋势提供借鉴.

从F04代码下属集成电路各研究方向的资助情况分析,目前集成电路设计领域资助最多的是集成电路设计领域的性能提升的研究项目,主要是“模拟、混合信号、射频集成电路设计”和“低功耗、高效集成电路设计”等方向,这与近十年来物联网、智能感知、人工智能领域飞速发展相关,集成电路设计领域发展迅速. 在EDA工具研究领域,基金委持续支持EDA领域各类项目的研究,针对集成电路设计自动化软件,基金委设立了“模拟集成电路敏捷设计方法与关键技术”专项项目,不过从项目阶段成果来看,与国产EDA厂家的平台接入还不够. 后续可以强化与自主可控平台的接入要求. 对于集成电路制造的领域资助,相对较少的方向是“集成电路制造的专用设备”. 这些领域也是“卡脖子”的领域,基金委虽然设立了重大科研仪器项目,但是项目支持的经费体量与集成电路产业仪器装备所需投入的差距有关,在重大科研仪器领域可以探索产业界与基金委联合支持模式. 提高整体支持强度实现集成电路产业链中关键重大科研仪器装备的国产替代. 在集成电路封测领域,“集成电路系统测试”和“器件、微纳集成系统建模与验证”等领域的研究项目相对较少,但从集成电路产业发展来看,需要更多的支持和与集成电路制造厂家更紧密的联系与对接. 后续可以探索企业联合基金模式,联合科技部、工信部等相关部委处室,对接国内集成电路制造厂家. 针对集成电路厂家发展中的痛点发布指南,让集成电路领域基金项目的研究与产业更好地对接.

随着人工智能、物联网、大数据等新兴技术的不断发展,以及社会对高性能计算、移动通信等需求的不断增加,集成电路领域的发展前景非常广阔. 科研人员已经开始探索未来人工智能在集成电路领域的应用. 特别是人工智能将在集成电路领域的单点工艺开发、电路设计、系统架构、设备工程、工艺整合、工艺过程管控和良率及可靠性等环节中能起到性能、效率提升及优化作用. 但针对集成电路行业高度复杂、专业性强、数据与信息较少且不易获取等特点,如何建立集成电路智能制造的人工智能学习大数据,人工智能如何与未开放接口的关键集成电路制造仪器和设备对接等问题,是人工智能在集成电路制造领域应用亟需解决的. 因此,建议国内科研院所、企事业单位的研究人员依托自主可控国产集成电路制造平台,在该领域中开展深入研究,探索新的技术和方法,推动我国集成电路产业的发展. 同时,国家自然科学基金委员会也应该继续加

加大对集成电路领域的支持力度,为该领域的发展提供有力的支撑.

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金“十四五”发展规划[Z]. 2022.
- [2] 唐华,施阁,何杰,等. 国家自然科学基金半导体科学与信息器件领域“十三五”至“十四五”期间资助状况与趋势[J]. 电子学报, 2022, 50(8): 1992-2002.
TANG H, SHI G, HE J, et al. Overview of the funding status and trends of NSFC projects in semiconductor science and information devices during the 13th to 14th five-year plan[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(8): 1992-2002. (in Chinese)

作者简介

唐 华 女,博士,国家自然科学基金委员会信息科学部四处研究员. 主要研究方向为光信息处理.

E-mail: tanghua@nsfc.gov.cn

施 阁 男,博士,中国计量大学机电工程学院教授. 主要研究方向为集成电路设计. 中国电子学会会员编号: E190015839S.

何 杰 男,博士,国家自然科学基金委员会信息科学部研究员. 主要研究方向为半导体科学. 中国电子学会会员编号: E190053934M.

刘 克 男,博士,国家自然科学基金委员会信息科学部教授. 主要研究方向为自动控制理论和应用.