

自然科学奖公示内容

一、 项目名称：硅基光子集成器件及其关键技术研究

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：

陕西省教育厅

本项目针对硅基光电子集成中低功耗调制、高灵敏度探测、高效耦合等关键科学问题，开展异质结电光调制器、硅基单光子探测器、纳米线阵列波导光栅及波导耦合器等基础研究，取得了一系列的技术创新成果和理论突破，为硅基光子集成技术的进一步发展和商业化应用奠定了坚实的基础。建立的硅/锗硅/硅双异质结能带模型与提出的“双异质结+齿形有源区”电光调制器结构，解决了传统调制器功耗高、热光效应影响大的难题；设计的光波导集成硅基单光子探测器、折叠可调氮化硅阵列波导光栅及 3D 渐变锥度波导耦合器等新型结构能够满足数据容量爆炸需求，有效减小芯片面积、抑制串扰，改进损耗、解决对准等难题，为硅基光子器件设计提供了新方法，推动了光电子集成学科的理论与技术进步。成果解决了硅基光电子器件的功耗、效率、集成度等核心瓶颈，为数据中心、云计算、人工智能等领域的高速光互连提供了关键技术支撑。与企业合作实现成果转化，对硅基光子器件及公司产品的研发具有良好的指导和借鉴作用，产生超千万元经济效益，推动了光电子产业升级。

提名该项目为陕西省自然科学奖二等奖。

三、 项目简介：

随着信息技术的飞速发展，对数据传输速度和处理能力的要求越来越高。由于材料的物理极限及电子瓶颈的存在，传统集成电路很难满足未来信息技术的高数据传输速率和处理速度等更高需求。硅基光子集成器件能够利用硅材料的高集成度、低成本和成熟工艺等优势，将光子器件与电子器件集成在同一芯片上，实现光与电的相互转换和传输。这种集成方式不仅可以提高数据传输速率和带宽密度，还可以降低能耗和散热问题，具有体积小、低成本、低功耗、超高速、与 CMOS 工艺兼容等特点，其在集成度、成本效益和兼容性方面的优势，成为实现高速、低功耗光通信和光计算系统和人工智能的关键，在光通信、光传感、光学信息处理等领域具有广阔的应用前景。

本项目研究聚焦于硅基光子集成器件的设计、制造和性能优化及关键技术，涵盖了光传输波导器件、波分复用器、硅基调制器、探测器等内容。在 3 项国家自然科学基金以及国家重点实验室基金、省自然科学基金等多个项目的支持下，基于硅基光子集成关键技术，设计和制备了应用于高效率、低功耗、高速率、高带宽等场景的一系列硅基光子集成器件，探索了硅/锗硅/硅双异质结、高密度硅基光子波分复用集成等关键技术，取得了一系列的技术创新成果和理论突破，为硅基光子集成技术的进一步发展和商业化应用奠定了坚实的基础。项目相关研究成果被国际知名 SCI 期刊 Nature Photonics、Nature Communications、Light: Science & Applications、Laser & Photonics Reviews、Optica、ACS Photonics 等他引百余次（单篇他引 111 次、51 次、48 次等），发表期刊论文 32 篇，授权国家专利 28 项，计算机软件著作权 5 部，主要成果情况如下：

（1）在**国家自然科学基金（NO. 61204080）**等项目的支持下，进行了锗硅/硅异质结电光调制器的研究，结合锗硅材料自身的高折射率、高迁移率等众多优点，设计出了一种新型结构的硅/锗硅/硅双异质结电光调制器芯片，能够极大地提高电光调制器的速度，降低其功耗，改善光集成电路的频率和功耗，有利于光集成电路的小型化和集成化，从而使光集成电路能早日替代电集成电路，对缓解能源危机也具有重要意义。

（2）在**国家自然科学基金（NO. 61674072）**等项目的支持下，进行了基于光波导集成的硅基单光子探测器的研究，针对自由空间光学平台的量子通信测试系统带来的庞大体积、高成本和易受干扰的问题，提出了一种新型的基于光波导集成的硅基雪崩型单光子探测器芯片。这种新型集成的单光子探测器具有集成波导结构，具备取代自由空间光路进行光信号传输和探测的潜力，对未来量子通信的研究和应用具有重要意义。

（3）在**国家自然科学基金（NO. 61764008）**等项目的支持下，进行了基于硅微环反射结构集成的折叠可调氮化硅纳米线阵列波导光栅的研究，以 SiN 纳米线波导为主要结构，与单片集成硅基微环反射结构相结合，具有更好的串扰和偏振性能以及集成度和致密性的优势，制备基于硅微环反射结构的折叠可调氮化硅阵列波导光栅（波分复用）芯片器件，为实现高密度硅基光子集成技术提供了新的技术途径。

(4) 在**国家重点实验室基金** (NO. SKL201804) 等项目的支持下, 进行了基于光传输波导连接器的研究与开发, 设计出了 3D 功能的高性能光学互连解决方案和版图辅助程序。能够显著减少了信号传输中的损耗和延迟, 为数据中心、云计算和人工智能领域提供了强有力的技术支持。同时, 这些成果的产业化应用也在积极推进中, 有望在未来促进我国光电子产业的快速发展, 提升我国在全球光通信领域的竞争力。

四、 客观评价:

本项目的研究工作受到 3 项国家自然科学基金、1 项国家重点实验基金、1 项陕西省自然科学基金、1 项陕西省教育厅专项科研计划, 以及 2 项横向课题的资助, 项目相关研究成果被国际知名 SCI 期刊 *Nature Photonics* (影响因子 34.9)、*Nature Communications* (影响因子 16.6)、*Light: Science & Applications* (影响因子 19.4)、*Applied Physics Reviews* (影响因子 19.5)、*Optica* (影响因子 10.4)、*Nanophotonics* (6.5)、*APL Photonics* (影响因子 6.4) 等他引百余次 (单篇他引 111 次、51 次、48 次等), 发表期刊论文 32 篇, 授权国家专利 28 项, 计算机软件著作权 5 部等。

(1) 异质结电光调制器方面, 建立了硅/锗硅/硅双异质结能带模型和硅/锗硅/硅双异质结电光调制器结构模型, 制作了硅/锗硅/硅双异质结电光调制器芯片, 该调制器将硅/锗硅/硅双异质结与波状有源区结构相结合, 不仅可以大幅度降低调制功耗, 而且可以有效抑制热光效应对电光调制的影响。教育部科技查新工作站出具的查新报告说明**该调制器结构具有更低的调制功耗和更高的调制效率**, “在国内公开发表的中文文献中与本项目查新点完全相同的未见报道”。该调制器芯片成功应用于西安奇芯光电科技有限公司、西安晟光硅研半导体科技有限公司等企业的产学研合作当中, 帮助企业优化了微射流激光加工设备的生产方案, 加快了设备研发进度, 提高了加工效率, 对促进航空航天特种材料加工行业经济发展, 具有明显的社会效益, 并产生了**超过千万元**的经济效益。

(2) 硅基单光子探测器方面, 提出了一种新型的基于光波导集成的硅基雪崩型单光子探测器 (见代表性论文 1-5)。Hao Jia 等在 *Optics Express* 上阐明我们利用波分复用 (WDM) 技术, 将波长复用器和解复用器集成到片上光子集成网络中, 能够满足对数据传输容量爆炸式增长的需求。 (*Optics Express*, 2017,

25:20699)；Zelu Wang 等在 *Optics Letters* 上列举出我们设计的阵列波导光栅光子器件具有强约束和大规模集成的优势 (*Optics Letters*, 2021, 46: 4232)。

(3) 纳米线阵列波导光栅方面，以 SiN 纳米线波导为主要结构，制备了基于硅微环反射结构的折叠可调氮化硅阵列波导光栅（见代表性论文 1-4）。Li 等在 *Light: Science & Applications* 上指出我们将阵列波导光栅的底端和反射器相连接的巧妙设计，可以有效抑制串扰区域的影响，并且可以减少芯片覆盖面积。

(*Light: Science & Applications* 2022, 11:174)；Hamed Arianfard 等在 *Applied Physics Reviews* 中报道了我们设计的阵列波导光栅 (AWG) 系统在 SOI 晶圆上进行制造，并实现了 1×2 多模干涉 (MMI) 耦合 (*Appl.Phys.Rev.*2023, 10:011309)

(4) 波导耦合器方面，设计了一种低损耗、高带宽的光纤到波导耦合器，该耦合器采用三维功能性的 SiO₂ 锥形结构，可用于硅光子集成芯片（见代表性论文 1-1，他引 51 次）。H.Wang 等在 *Nanophotonics* 上明确指出我们设计的 3D 渐变锥度结构可进一步改进光纤芯片耦合的损耗。(*Nanophoton.*2018,7:1469)；Francesco Morichetti 等在 *Nature Communications* 上的质量验证评估中说明，光纤到芯片耦合可以通过使用我们优化的悬挂锥形结构，能够让传输波长相关损耗降至小于 0.2 dB 水平 (*Nat. Commun.*2021,12:4324)；Yong Zhang 等在 APL Photonics 上指出通过我们设计的多层耦合器可以解决硅基材料间对准的难题 (*APL Photon.* 2024,9:090902)。

五、 代表性论文专著目录：

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码 (xx 年 xx 卷 xx 页)	发表时间 (年 月 日)	通讯作者 (含 共 同)	第一作者 (含 共 同)	国内作者	知识产权 是否归国内 所有
1	Low loss fiber-to-waveguide converter with a 3-D functional taper for silicon photonics	IEEE Photonics Technology Letters	Qing Fang, Junfeng Song, Xianshu Luo, Xiaoguang Tu, Lianxi Jia, Mingbin Yu, and Guoqiang Lo	28 2533	2016	Qing Fang	Qing Fang	方青、宋俊峰、罗贤淑、涂小光、贾连希、余明斌、罗国强	是
2	Research on a Micro-Nano Si/SiGe/Si Double	Advances in Condensed Matter Physics	Song Feng ,Lianbi Li , and Bin Xue	2018 8297650	2018	Lianbi Li	Song Feng	冯松、李连碧、薛斌	是

	Heterojunction Electro-Optic Modulation Structure								
3	Micro-nano electro-optic modulator structure based on the Si/SiGe/Si materil	Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics	Song Feng , and Bin Xue	15 693	2020	Song Feng	Song Feng	冯松、薛斌	是
4	Folded Silicon-Photonics Arrayed Waveguide Grating Integrated With Loop-Mirror Reflectors	IEEE Photonics Journal	Qing Fang , Xiaoling Chen, Yingxuan Zhao , Juan Hu, Hua Chen, Chao Qiu, and Mingbin Yu	10 4900508	2018	Qing Fang	Qing Fang	方青、陈晓琳、赵颖璇、胡娟、陈华、仇超、余明斌	是
5	Low-crosstalk silicon photonics arrayed waveguide grating	Chinese Optics Letters	Zhiqun Zhang , Juan Hu, Hua Chen, Fangjiang Li, Lei Zhao, Jinbin Gui, and Qing Fang	15 041301	2017	Qing Fang	Zhiqun Zhang	张志群、胡娟、陈华、李方江、赵磊、桂进斌、方青	是
6	硅、锗半导体材料的异质结光电应用	吉林大学出版社	李连碧, 冯 松, 臧源	2019 年 5 月	2019			李连碧、冯 松、臧 源	是
<p>承诺：该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。因未如实告知上述情况而引起争议，且不能提供相应存档备查的证据，本人愿意承担相应责任，并接受处理。</p>									

六、 主要完成人情况：

主要完成人：（依次列写完成人姓名）

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	冯松	教授	系主任	西安工程大学	西安工程大学	项目负责人，聚焦于硅基光子集成器件的设计、制造和性能优化及关键技术，探索了硅/锗硅/硅双异质结理论，设计和制备了应用于 高效率、低功耗、高速率、高带宽等场景的一系列硅基光子集成器件。

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
2	方青	教授	无	昆明理工大学	昆明理工大学	项目组主要成员，聚焦于硅基光子集成器件的设计、制造和性能优化及关键技术，研究了波分复用器、光子探测器等内容。
3	薛斌	馆员	无	西安工程大学	西安工程大学	项目组主要成员，聚焦于硅基光子集成器件的设计、制造和性能优化及关键技术，进行了前沿数据分析、模型建立等研究内容。
4	陈华	教授	副系主任	昆明理工大学	昆明理工大学	项目组主要成员，聚焦于硅基光子集成器件的设计、制造和性能优化及关键技术，研究了单片集成硅基微环反射结构、氮化硅纳米线等内容。

七、 主要完成单位情况：

主要完成单位：（依次列写完成单位名称）

排 名	完成单位	贡 献
1	西安工程大学	对本项目的实施所需要的人力，物力和工作时间等条件给予了保障，协助完成人进行了锗硅异质结电光调制器、波导耦合器等方面研究。
2	昆明理工大学	对本项目的实施所需要的人力，物力和工作时间等条件给予了保障，协助完成人进行了波分复用器、光子探测器等方面研究。

八、 完成人合作关系说明

项目完成人在 2013 年至 2023 年间，围绕硅基光子集成器件及其关键技术问题，进行了论文合著、共同立项等多方面的合作。

2013 年 1 月至 2023 年 11 月，项目完成人冯松与项目组成员共同立项 5 项，合作发表论文 2 篇（见代表性论文②③），形成共同知识产权 2 项（见共同知识产权①②）。

2017 年 1 月至 2023 年 11 月，项目完成人方青与项目组成员共同立项 3 项，合作发表论文 2 篇（见代表性论文④、⑤）。

2015 年 1 月至 2023 年 11 月，项目完成人薛斌与项目组成员共同立项 3 项，合作发表论文 2 篇（见代表性论文②③），形成共同知识产权 2 项（见共同知识产权①②）。

2017 年 1 月至 2023 年 11 月，项目完成人陈华与项目组成员共同立项 1 项，
合作发表论文 2 篇（见代表性论文④、⑤）。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果名称
1	共同立项 论文合著	方青 2	2017 年 1 月至 2023 年 11 月	共同立项 1、5、6 项目 合作发表论文 2 篇 （见代表性论文 ④、⑤、）
3	共同立项 论文合著 共同知识产权	薛斌 3	2015 年 1 月至 2023 年 11 月	共同立项 2、3、4 项目 合作发表论文 2 篇 （见代表性论文② ③） 共同知识产权 2 项
4	共同立项 论文合著	陈华 4	2017 年 1 月至 2023 年 11 月	共同立项 1 项目 合作发表论文 2 篇 （见代表性论文 ④、⑤）