# 戴道锌、Patrick Lo、苏翼凯圆桌会谈

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/31871.html

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

**戴道锌、Patrick Lo、苏翼凯圆桌会谈**。硅基光子学对于集成光子电路、打破摩尔定律具有关键意义，吸引了大量的学术研究与产业投资。据此，我们邀请硅基光子学领域的学术界领航者——浙江大学戴道锌教授、上海交通大学苏翼凯教授，以及产业界的杰出领袖——AMF公司创始人Patrick Lo总监进行圆桌会谈，探讨硅基光子学与集成光子电路的展望、机遇与挑战，呈现横跨学术、产业的多方视角。




人物简介

(按姓氏拼音排序)

戴道锌，浙江大学光电科学与工程学院院长、求是特聘教授，国家杰青，浙江省光学学会理事长。戴道锌教授于2005年获博士学位（浙江大学-瑞典皇家工学院联合培养），后入职浙江大学工作至今，2008-2011年在美国加州大学圣巴巴拉分校访学。其在多模硅光子学、片上偏振调控、硅+光子学等方面取得重要进展，获中国光学科技一等奖、浙江省自然科学奖一等奖、王大珩光学奖等重要奖项，在Science、Nature、Nature Photonics、Light: Science Applications等期刊发表论文350余篇。担任多种国际权威期刊编委。

Pactrick Lo总监，AMF公司首席技术官。Pactrick

Lo总监于美国德克萨斯大学奥斯汀分校获得博士学位，随后在美国Integrated Device Technology公司从事研究工作。2004年起，他在新加坡微电子研究所工作，历任实验室主任、副所长。2017年，他共同创办了AMF公司（Advanced Micro Foundry Pte Ltd）并担任总裁，目前担任首席技术官。因其在纳米电子学和光子学方面的突破性工作，于2008年和2010年分别获得新加坡国家技术奖和总统技术奖。

苏翼凯，上海交通大学特聘教授，国家杰青，科技部重点专项专家，IEEE光子学会上海分会主席。苏翼凯教授于美国西北大学获得博士学位，随后在美国新泽西州贝尔实验室工作，并于2004年至今担任上海交通大学教授。其在光电子器件及集成、传输与交换光子学方面取得了一系列突破，获教育部自然科学一等奖等重要奖项，在Light: Science Applications等国际顶刊发表论文400余篇。担任多种国际权威期刊编委。

「受访者」：戴道锌教授（浙江大学）、Patrick Lo总监（AMF公司创始人）、苏翼凯教授（上海交通大学）【按姓氏拼音排序】

「采访者翻译」：万雅婷、郭宸孜

「致谢」郭宸孜致谢中国科学院青年创新促进会会员项目[No.20231214]、中国科技期刊卓越行动计划选育高水平办刊人才子项目-青年人才支持项目[No.2023ZZ052213]

Q：请简述您在硅光子学领域的研究方向、入行初衷及研究重点的变化？

A：苏教授：我们的团队（光传输与集成光子学实验室）自2006年起开始从事硅光子学，主要是硅基单元器件的研究。最初，我被硅的高折射率所吸引，因为它有利于高密度集成。同时，硅与现有的CMOS工艺相兼容，因此相较于III－V族半导体等更易于制造。近期，我们的研究重点已拓展至其它具有前景的材料，例如氮化硅与铌酸锂的异质集成，其独特性质可以弥补硅的局限。

A：戴教授：我的团队致力于高性能硅光器件及应用研究，旨在构建面向光互连和光计算等领域的大规模硅光集成回路。我对该领域的兴趣始于2002年，当时还是博士生，在开展硅基二氧化硅平面光波导器件研究，很快我意识到其弱限制能力严重制约了高密度光子集成的发展。与此同时，我注意到硅光波导具有实现超高集成度的强光场约束能力，于是开启了硅光波导及器件的研究，涵盖了无源器件、有源器件及其功能集成等方面。

A：Patrick：我在攻读博士和进入工业届的初期，主要从事CMOS工艺和晶体管器件研究。2004年移居新加坡后，我开始探索替代的半导体技术，并在2006年涉足硅光子学，关注到其在超越摩尔定律方面的潜力。从电子到光子和电子的转变也让我十分着迷。当时在新加坡微电子研究所，我们紧随英特尔，率先开发了基于电容的调制器。有别于纯学术或纯工业研究，我一直致力于构建有望过渡至产业的技术平台。期间，我的关注点在设备物理与终端应用间不断切换，以推进研究成果商业化。在工业伙伴的合作下，我们团队成功推出了首款100G相干产品及后续400G产品。这些从实验室到市场的转化，振奋了工业界与学术界的信心，促使政府及私营企业大幅增加研发投入，推动行业发展迈向全球。

Q：鉴于硅光子学的快速发展及主要代工厂可提供的大量服务，硅光子学当前面临的主要挑战是什么？

A：戴教授：尽管硅光子学已成为主流技术，但我们在高性能器件及高产量、大规模集成回路方

面仍然面临很多挑战。例如，典型的单模硅波导（横截面：450nm×220nm）损耗为1 – 2 dB/cm，而该损耗值在长距离传输应用场景中其实并不能接受。未来，面向实际应用需求，我们还需进一步解决三方面问题：一、探索超越硅的新材料，以突破其材料限制；二、突破单模条件设计框架，突破传输损耗和随机相位误差带来的器件性能瓶颈；三、研究可见光/中红外等波段新器件，以拓宽其应用领域。因此，机遇与挑战并存！

A：Patrick：我关注的挑战主要从工业视角出发。硅在光学领域并非最优材料，但在集成方面表现卓越。拓展硅光子学应用需引入多种材料，以适应不同波长、功能及性能需求。另一方面，经济可行性、投资与回报问题仍是核心。尽管部分硅基应用已被开发，但相较于CMOS等电子学技术，我们尚未发现硅基的杀手锏应用，因此难以吸引大规模投资。未来，工业与学术界的紧密协作将对持续探寻高影响力应用至关重要。

A：苏教授：基础研究和应用之间的确需要平衡，但我关注的挑战主要还是从学术出发。首先，低成本、高功率、高效激光源与硅的集成仍旧面临挑战。其次，在调制方面，由于载流子色散效应，硅已接近其理论极限（约100 GHz）。要突破这一极限，需要引入铌酸锂或钛酸钡等材料，以缩小调制器尺寸。最终，异质集成可能是突破单一材料系统当前限制的必经之路。

Q： 目前，先进集成电路在7nm乃至5nm工艺中，已经能实现约90%的良率，硅光子学对于规模化工艺和良率有何预期？

A：Patrick：在光子学领域，由于尺寸与波长相关，我们无需使用几纳米的工艺。尽管英特尔等代工厂在12英寸晶圆上采用32nm工艺生产，但该精度往往超出光子学应用所需。未来相当一段时间内，我认为80nm或90nm工艺已经足够。尽管更小尺寸并非必需，但其在提升器件（如光开关、波分复用等）均匀性方面作用显著。个人认为，相较于规模化工艺和良率本身，目前硅光子学更需要关注的是单芯片上不同材料与功能的结合，特别是当硅与锗在带宽、功耗等方面遭遇瓶颈时。异质集成与混合集成均具有巨大潜力，但是其关键在于能否兼具性能与经济可行性。

Q：众多行业领军企业已开始推出支持硅光子学的高速电子芯片，在此情形下，电光集成还面临什么主要挑战？

A：Patrick: 当前主要挑战在于优化电光集成，并平衡性能。目前，部分代工厂更重视电子学性能，而牺牲了部分光子学性能，因此需要找到平衡性能且成本较低的解决方案。而在封装领域，共封装光学（CPO）的普及也面临障碍，因为它要求变革现有供应链。为了驱动工业界寻找最优的封装和平衡方案，我们需要展示电光集成带来的切实应用价值。正如我此前提到的，这需要学术与工业界通力合作，推动跨学科研究。

Q：领域内的学生们常常会面临多种职业选择，比如：学术界、工业界或创业，您会给他们什么建议？

A：苏教授：对于学生而言，最佳的选择往往取决于其个人优势、个性以及潜在机遇，没有统一的答案。普遍而言，我认为大公司或知名研究机构可以提供广泛的支持和资源，有助于毕业生更有效地提升专业和技能；而加入初创公司则意味着职责范围更广，有望在技术知识和商业理解方面更快成长。

Q：未来几年，硅光子学的哪些应用值得特别关注？

A：戴教授：首先，硅基片上光学测量是极具前景的方向之一。我们目前正致力于硅基片上高性能光谱仪的研究，其主要特点是体积小和成本低。一般来讲，片上光谱仪的分辨率和光谱范围往往还存在一定局限性，我们团队正探索结合多通道光滤波器与波导型光电探测器阵列的全集成方案。另一方面，硅基光计算仍处于比较早期的阶段，但随着器件性能和集成能力的发展，其前景令人期待。当前，我们亟需构建强大的功能元器件体系，推动大规模集成光计算芯片的发展。

Q：说到构建基础模块。我们学术界如何在其中做贡献，尤其是在无源硅光子学方面？

A：戴教授：在大规模硅光芯片中，无源器件数量占比有可能高达80%以上，是硅光集成系统的重要组成部分。尽管许多单个无源器件的性能已经十分不错，但大规模集成往往要求在宽带范围内实现极低的损耗和串扰，因此对其无源器件性能提出了极高要求。以大规模N×N光开关为例，整个系统包含了数以千计甚至更多的开关单元，传统的2×2马赫-曾德尔开关受到耦合器损耗及干涉臂随机相位误差等影响而难以满足性能要求。因此，亟需发展具有更好工艺容差的新器件设计，从而在常规工艺条件仍可获得近乎完美的性能，减少其校准复杂度，实现系统表现的跃升。

Q：代工厂如何在硅光子学制造中平衡定制工艺需求与标准化的必要性？

A：Patrick: 以我共同创立的AMF公司（Advanced Micro Foundry Pte Ltd）为例。从创立起，标准化一直是我们战略的核心，旨在确保生产的可重复性和一致性。然而，鉴于新应用的快速变化和技术的不断演变，往往需要在一定程度上进行定制。因此，代工厂需要具备定制化的意愿以及灵活性，并最终将不同的定制化发展至标准化。尤其是在光子学领域，每个阶段都需要独特的优化，因此定制是不可或缺的。但需要明确的是，标准化并不是对器件或工艺的简单统一，而是一种理念。我们需要在定制与标准化之间寻求平衡，确保设计的可制造性、可持续性以及规模化能力，还需要考虑可变性和可测试性。以光子制造为例，无源电路作为第一层，决定了所有后续的光学功能，因此任何定制都需要考虑这一核心架构。

Q：硅光子学与VCSEL、磷化铟等技术在单模应用方面的竞争力，以及与铌酸锂技术在相干应用方面的竞争力？

A：苏教授：不同的材料平台在不同应用中各具优势。硅有利于高密度集成，且灵活度高，易于与其他材料混合或异质集成。III-V族材料（如磷化铟）在VCSEL（垂直腔面发射激光器）或EML（电吸收调制激光器）中体现了优越的性能；其功耗低，适合光互连。铌酸锂的调制速度高达太赫兹级别，适用于≥400G的高数据率应用。因此，各类技术的竞争力将取决于应用背景以及成本、良率等。

A：戴教授：硅光技术适合大规模集成和大规模生成，是研发消费电子类产品的理想平台之一。而对于光通信骨干网应用，铌酸锂材料可实现超高速电光调制，是一个极具吸引力的选择。另一方面，铌酸锂材料电光系数不高，促使人们关注钛酸钡等新型材料，以发展更加高效的超紧凑光学调制器。随着更多的新材料探索和引入，以硅为基础并结合多材料融合集成，有可能成为一种极具竞争力的方案。

Q：您提到更多的新材料探索，指的是什么？

A：戴教授：当前，很多研究者对集成零维、一维及二维材料产生了浓厚兴趣，这些材料各具独特性质，具有功能多样和低制造成本的潜力。例如，可将二维材料直接置于晶圆或光波导之上，

构建片上集成调制器或探测器。但相关技术尚处于初级阶段，特别是晶圆级集成方面还需要大量研究。

Q：您如何看待EML的8×200Gbps解决方案与硅光子学在数据中心应用领域的竞争？

A：Patrick: EML与硅光子学之间的竞争不仅关乎技术性能，还涉及成本、供应链成熟度及产品交付周期。硅光子学的劣势在于：1）包含更多生产层，导致生产周期长且供应链相对不成熟；2）封装的限制。然而，硅光子学在高集成方面展现了优势。例如，尽管EML在400G DR或FR中成本略低，但在400G ZR模块中，硅光子学更具成本效益。当容量进一步提升至1.6T应用场景时，由于需要很高的集成度和更多的激光器，硅光子学就会具备显著的成本优势。因此，我认为在未来的1.6T模块等高通量应用中，硅光子学将极具优势。

Q：对于集成光子电路，有人认为所有元件应该由单一材料制造，而非集成不同的材料。您对此持何种观点？

A：戴教授: 我认为集成不同材料是很有必要的，因为目前还没有任何单一材料能满足所有的功能需求。例如，III-V族半导体在有源器件方面性能优越，但存在晶圆尺寸小、光损耗高等局限。对于仅需少量激光器的应用场景，采用外部光源也不失为一种可行方案；而对于需要大规模激光阵列的应用，则采用片上异质集成可能更有利于解决负责的封装耦合问题。又比如，薄膜铌酸锂平台的优点是适合高速调制，但还存在光学束缚不强和侧壁倾斜角度大等情况，导致其弯曲半径及器件尺寸偏大、模式转换较为复杂等问题。相较之下，具有电光效应的PZT薄膜可方便地在硅衬底上通过旋涂进行制备，提供了另外一种具有发展潜力的选择。此外，铌酸锂的各向异性特性也使其器件设计往往比硅光器件更加复杂，但是它独特的非线性特性使其在许多应用中独占优势。未来发展进一步需要平衡成本与性能，融合多种材料的优势，但同时避免引入过多材料种类，发展硅基少材料体系的光子集成技术。

A：苏教授：的确，没有任何材料是完美的。正如前面提到的，铌酸锂在高速调制中表现出色，但它的制造复杂性，如在大规模集成中如何控制侧壁角度，则存在着挑战。而III-V族材料在有源器件中表现出色，但面临着复杂的层叠问题和良率问题。因此我也认为，将多种材料集成至统一平台是未来的趋势。

A：Patrick：一方面，我支持探索多种新材料并尝试集成，但另一方面，我也希望保持开放思维，探索所有的技术道路，包括将现有的平台与能力最大化。例如，我们与合作者一起探索了基于聚合物的调制器。与铌酸锂相比，聚合物具有更好的电光系数，带宽主要受电场的影响，不需要额外的重大投资就可以集成到现有工艺中。作为工业界人士，我们对于将新材料引入到大规模生产中保持谨慎，直到其展现出必要性、可靠性、成熟度和成本效益。我认为在未来的博弈中，每种技术都会找到它们在行业的最终角色，挑战与机会总是并存的。

Q：工作中的哪个维度，让您感到成就和激励？

A：苏教授：首先我一向对硅光领域具有很高的热情，看到本领域的突破性发展总是令人兴奋。第二，看到本领域的研究成果转化为商业产品，比如硅基相干接收器和发射器，令人感到有成就感。第三，我对光子芯片的未来可能性看好，并让我充满期待。

A：戴教授: 对我而言，最有获得感的是建立比较完整的高性能功能器件并发展大规模硅光芯片集成。未来，我们希望能够进一步降低损耗，提高激光源功率，提升检测灵敏度，增强片上系统

信噪比，实现晶圆级的高一致性，进一步探索硅光子学在1550 nm通信波段之外的新应用。

A：Patrick：最具成就感和激励的部分，是当我看到我们的技术成熟并转化为商业产品。尤其是在当下，随着各项技术周期的缩短，如何迅速将创新成果推向市场并产生影响，是兼具挑战与激励的。因此，我常常期待学术界合作伙伴关于工程化的详细分享——不仅仅是成功，还有失败——因为这些见解对于开发行业产品非常宝贵。而产品的创收反过来，也会为新的研究项目启动注入资本。

Q：未来，您希望为硅光子学解决什么重要挑战？

A：苏教授：我关注的主要挑战是实现大容量的光子芯片。美国国防部高级研究计划局（DARPA）有个重大项目，计划在2030年之前实现1 Petabit/s的光子集成芯片，这其中有几个突出挑战，有的已经超越了硅光子学范畴。首先，芯片要达到1 Petabit/s（通道数范围在1000-10,000之间）。这需要显著缩小元器件尺寸，有可能需要通过全新技术途径实现。第二，提高功率效率至关重要，尤其是调制器、探测器和激光源的功效。第三，为了在最小的光纤下实现如此高的容量，我们需要使用先进的复用技术（如空间复用、模式复用或波长复用）大幅扩展带宽能力。此外，DARPA还有个项目正在探索三维光子集成芯片，这可能涉及在芯片内和芯片之间创建多层光子结构。如果在单一芯片上实现Petabit级别容量太难，则替代方案可以将该容量分布到多个互联的芯片上。解决如上挑战需要发明新技术，并重新审视我们的基础理论（因为我们正接近理论极限）。未来十年将充满了巨大的机会。

Q：您认为产业界最需要学术界提供什么？

A：Patrick：学生！我们需要在多个领域（不仅仅是光学和电子学，还有热管理、机械可靠性等）受过良好训练的全面人才，因为光学是一个复杂的领域，受到众多因素的影响。学术界应当拓展可能性的边界，而不受当前供应链限制的束缚，促进创新的涌现。

Q：您期望《Light: Science Applications》带来哪些见解？

A：Patrick: 我期待看到LSA不仅刊发成果，也报道那些方法论和挑战，甚至是分享失败和挫折，这可以为读者创造更丰富、更有益的学习环境。

A：苏教授：我期待看到LSA刊发表那些用跨学科研究解决极具挑战性的重要课题的文章。

A：戴教授：我期待看到LSA关注领域的重大挑战，发掘和展示年轻研究人员的创新思想。

本期采访者



郭宸孜，博士，副编审。任中国科学院长春光学精密机械与物理研究所Light学术出版中心副主任、卓越计划高起点新刊eLight编辑部主任、卓越计划领军期刊Light: Science Applications责任编辑。中国科学院青年创新促进会会员，中国科技期刊编辑学会国际交流与合作工作委员会委员、青委会委员，吉林省科技期刊工作者协会理事。入选中国科技期刊卓越计划优秀百人案例，获第三届中国科技期刊青年编辑大赛一等奖、中国科技期刊卓越计划优秀编辑、中国科协优秀科技论文编辑表彰、中国科学院科技出版先进个人奖、长春分院青年先锋，长春光机所第二届先进个人等奖项。主持卓越计划高起点新刊项目等国家、省部级项目6项，在Nano Today、Science China Materials、Applied Optics、《编辑学报》等学术期刊发表论文30余篇，作为共同作者出版译著1部（《光学与光子学：美国不可或缺的关键技术》，科学出版社），受邀在国内外学术会议作报告30次。



万雅婷博士是沙特阿卜杜拉国王科技大学（KAUST）的助理教授，专注于硅光子学，尤其是片上光源的集成研究（https://cemse.kaust.edu.sa/ipl）。她于2017年在香港科技大学（HKUST）获得博士学位（导师为Kei May Lau教授）。2016年至2022年期间，她在加州大学圣巴巴拉分校（UCSB）进行博士后研究（导师为John Bowers教授），主导了Intel关于异质集成量子点激光器的项目，为实现兼容硅CMOS的光源做出了重要贡献。万博士已发表超过100篇经过同行评审的论文(58篇期刊，43篇会议)，包括29篇第一作者期刊论文（其中10篇为封面文章），7篇通讯作者期刊论文，并在国际会议上做了超过20场特邀报告。她的研究成果被引用超过3500次，h指数为33，获得了多项国际重要奖项，包括香港科技大学PhD Research Excellence Award（2017年）、PIERS Young Scientist Award（2018年）、CLEO Tingye Li Innovation Prize（2021年）、Light: Science Applications评选的Rising Stars of Light（2022年）、《麻省理工科技评论》中国35岁以下科技创新35人（2023年）、Optica Ambassador（2024年），以及与《自然》合作的Sony Women in Technology Award（2025年）。她目前担任《Light：Science Applications》沙特办公室专栏编辑，《Applied Optics》和IEEE《JQE》的副编辑，IEEE《JSTQE》的客座副编辑，并在IPC和CLEO担任TPC委员，同时是IEEE光子学会（IPS）会议委员会的成员。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-024-01650-8

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：郭宸孜等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发