

公开信

尊敬的各位前辈和朋友

你们好！

我是陈向飞，南京大学现代工程与应用科学学院的教授，在创新创业中，幸运地遇到了历史机遇，同时因为底子薄等原因，也遇到了极大困难。为此本人期望借助于公开的方式，能够找到解决问题的关键。

“芯片是中国制造产业之痛”，不过我不是做集成电路（Integrated circuits, IC），是研发光子集成芯片的。光子集成芯片被国际称为 PIC（photonic integrated circuit），PIC 与传统 IC 类似，就是把多个光学功能器件集成到一个芯片上。PIC 属于光子学范畴，PIC 之于光子技术的战略意义等同于 IC 之于电子技术。

2015 年 7 月 27 日，美国副总统拜登宣布成立集成光子制造创新研究院 AIM-Photonics，5 年总投资 6.1 亿美元，合作单位包含 Intel 和思科公司等美国重要的半导体公司，是目前已经公布的 9 家制造业创新研究院投入最大的一家【<http://www.toutiao.com/i6260816247923933698/>】。其中一个依据是光子技术是全球市场规模 4.7 万亿美元 IT/通讯产业的核心使能技术，未来 10-20 年，带宽需求预计为现量的 100 倍，目前尚无可实现这一技术的解决方法，光子集成是具有潜力的技术【<http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=8580>】。

光子集成属于芯片技术领域，与高端 IC 一样，中国面临巨大的产业挑战。正如全国人大代表、武汉邮科院童国华在 2015 年全国“两会”的建议《大力推动光电子器件产业的发展和创新发展》所描述的，核心光电子器件大部分依靠进口，高端产品几乎空白【http://www.cnii.com.cn/2015-03/16/content_1545277.htm】。

激光被认为是二十世纪最伟大发明之一，在 PIC 中，集成激光器阵列就是把多个激光器集成到一个芯片上，为 PIC 提供传输信号的光源，相当于 PIC 的“发动机”，非常重要。

由于波长控制灵活和模式稳定性好，大规模激光器阵列采用分布反馈（distributed feedback, DFB）结构，国外主流制造技术采用被西方国家垄断的高精度电子束曝光（electron beam lithography, EBL），通过控制 10nm 大小的电子束在晶片上刻写精细 DFB 光栅。面向大规模制造，该方法有两个不利之处：（1）因为逐点扫描写入，制造时间随着激光器数目增加成倍增加，耗时长；（2）对环境敏感，波长间隔控制精度差，满足频率间隔 100GHz@1550nm 通信波段的国际标准，对应光栅周期间隔约 0.13nm，相当于一个原子的尺寸，固有的刻写缺陷加之拼接误差【https://en.wikipedia.org/wiki/Electron-beam_lithography】，保持这样精准度很难，有报道说明典型波长误差达 3nm【IEEE Photonics Technology Letters, Vol.24, 1063(2012)】。

偶然机会我们发明了一种特殊的集成激光器阵列技术，称之为基于重构-等效啁啾（reconstruction-equivalent chirp, REC）技术的激光器阵列【发明专利 CN200610038728.9; CN2008101565920; US 7873089 B2; Optics Express, Vol.17, 5240(2009)】，该技术完全是在中国提出并发展起来的一种与国外完全不同激光器阵列技术。REC 技术利用一次普通全息曝光加上一步微米量级图形光刻来等效实现各种复杂的纳米光栅结构，即利用大尺寸结构（采样图案）调控小周期的均匀光栅，等效实现各种纳米精细结构，比如等效啁啾，等效相移等。这样制造上与传统商业成熟普通 DFB 激光器制造流程对比，中间只多了一步 1 微米尺度以上的普通光刻，该 DFB 光栅结构广泛应用于基于游标卡尺（Vernier）效应的可调谐激光器制造上。因此 REC 集成激光器阵列的制造本身就是商业成熟的。

最令人惊喜的是发现波长间隔控制精度比传统 EBL 方法理论上可提高约 2 个数量级，实现对波长微结构非常精准的控制【Optics Letters, Vol.37, 3315(2012)】，也被国外知名研究组证实。创记录的 60 波长的激光器阵列实验结果表明【Scientific Reports, Vol. 4, 07377 (2014)】，约 83% 的波长间隔线性度控制在 $\pm 0.2\text{nm}$ 之内；相比之下，贝尔实验室采用 EBL 获得的结果仅为 35%【IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol.14, 967 (1996)】。最新实验结果表明典型线性波长误差已经接近 $\pm 0.1\text{nm}$ 【Optics Letters, Vol.40, 5136(2015)】，好于传统方法数十倍，解决了 20 多年没有解决的波长控制误差大难题！

为此在南京大学和朋友等的支持下，2012 年开始尝试进行产业化和商业化，为了技术转化为生产力的理想，我们坚持不懈努力做事。但是真正要获得产业成功，困难比想象要大得多。

首先，虽然光芯片目前还处于发展阶段，还远没有像 IC 一样成熟，但因为都是信息领域的芯片技术，是国外先进国家优势竞争力所在和重点发展的方向。不仅核心制造设备和先进工艺都被这些国家牢牢掌控，一些国外著名电子企业如 Intel、IBM、Avago、Cisco 等亦进入到光芯片领域，竞争态势变得和 IC 一样，实际情况也是“大投入，大收益；中投入，没收益；小投入，大亏损”。与高端 IC 制造类似，自改革开放以

来，在面向信息网络应用的高端光芯片制造上，中国内地几乎没有发生过特别令人欣喜的商业案例，使投资者望而生畏，导致在激光器芯片制造上获得充足资金、踏踏实实做好工艺是一个很困难的事情。

第二，由于我们的研发完成从零开始，南京大学过去也无研究基础，国内激光器芯片制造基础也比较薄弱，海外代工不畅且限制较大，导致无论借助自身力量还是外部力量都无法使优势技术充分发挥。

第三，商业成功涉及方方面面，技术只是一个方面，资金、管理、项目运作和工艺都是关键因素，由于个人能力和条件的限制，要充分把技术优势转化为商业优势，自身团队力量明显不足。

如果以上问题不及时得到解决，历史的机遇可能很容易就错过，留下不小的遗憾。与国外进行商业竞争，REC 技术也不是万能的。一方面 REC 技术的核心思路是用等效结构来代替传统的直接结构，解决了传统技术无法解决的波长间隔精准控制难题，但也带来了不足，导致 REC 激光器的光栅强度需要传统 DFB 激光器的 3 倍才能够完全等效。一个简单的解决方法就是增加光栅深度提高光栅强度，这需要投入资金掌握好相关工艺。另一方面，国外资金实力强，工艺基础好，技术储备雄厚，这些方面我们劣势非常明显。

因此开始阶段做什么样的产品，对于在有限时间内取得有影响的商业成功将变得非常关键。我们不能好高骛远，面对世界强大对手，尽可能避开国外领先产品和先进制造工艺竞争，找到能够充分发挥 REC 技术优势的对路产品，通过知识产权保护手段形成商业优势，实现弯道超车。选择的产品尽可能满足如下几个条件：（1）市场前景很好，在商业应用上将越来越重要；（2）尽可能把 REC 技术的优点发挥得淋漓尽致，弥补我们工艺上差距，只基于二流工艺或者准一流工艺，就能够实现一流的高端激光器产品。

经过这几年多方探索，选择目前还远没有产业化成功的**低成本半导体可调谐激光器**（大规模应用的价格要低于 100 美元）和**快速可调谐激光器**（快于 1 微秒）作为商业突破点！基本思路叙述如下：

未来的网络要向智能化软件定义网络（SDN）发展，需要大量的波长可调谐激光器，这样的市场潜力巨大，未来市场有希望达到数千万只以上，但是现有成本在数百美元的半导体可调谐激光器无法满足大规模应用的价格要求。另一方面未来巨大的数据交换网络需要快速可调谐激光器来实现低延时无阻塞交换。

目前商业主流半导体可调谐激光器采用游标卡尺效应，这种激光器具有前后两个反馈元件，能够产生自由谱区（FSR）略微有些不同的两个梳状谱，通过调谐梳状滤波器，在不同梳状谱位置实现前后谱模式的对准，配合相位调节，使对准波长具有最大的增益。采用电流调谐其速度在纳秒量级，但是由于调谐过程中总存在环境（如热）的变化，而该激光器对准容差小，容易形成模式不稳定，封装后器件不一定满足产品要求，导致实际成品率低且控制复杂，即使不算芯片制造成本，也很难满足低成本要求。同时只有环境稳定后才能够实现稳定的激光模式，实际调谐速度最终也受限于热稳定时间，即毫秒量级，远远慢于 1 微秒。因此这种主流机制即不满足低成本要求，也不满足快速可调谐要求。

半导体可调谐激光器还有一种已经商用的实现方式，即采用 DFB 激光器阵列，通过拼接多个热调谐 DFB 激光器来实现更大的调谐范围。相移 DFB 激光器的模式很稳定，其控制方法简单，具有理论上实现低成本和快速可调谐能力。但是如果制造激光器采用目前主流的 EBL 方法，芯片制造成本相对高，同时波长间隔控制差，其实际控制和测试成本随着单元激光器数目和误差同步增加。

挑战低成本和快速可调谐这两种市场急需、但是还没有商业产品的可调谐激光器，我们的方案还是采用 DFB 激光器阵列，但只采用自主 REC 集成激光器阵列【IEEE Photon. Technology Letters, Vol.27, 530(2015)】，实现简单便宜的制造和精准波长间隔的控制，使大规模产品制造真正能够实现。实现技术简单描述如下。

1. 低成本可调谐激光器

调谐激光器的成本主要来自于几个部分：芯片制造，控制/测试和封装。采用 DFB 激光器阵列的控制系统比较简单，但是前提是波长间隔准确。如果波长间隔误差大，控制参数和测试都将变得复杂，成本也将上升。对于封装，目前的可调谐激光器都需要温度控制，来保证可调谐激光器的稳定性，相关的材料成本已经基本见底，难以大幅度进一步降低，这也是成本之一。

由于采用最简单商业成熟 DFB 激光器生产工艺，如果工艺成熟可靠，REC 集成激光器阵列的制造成本非常低。因为波长控制准确，REC 阵列可调谐激光器的控制简单，测试也可以实现自动化，相关成本可以降低到最低水平。对于封装，如果采用温控封装，就需要气密性封装材料，其成本和现有的可调谐激光器相当。如果把 DFB 激光器阵列做得足够多，波长间隔控制足够精确，把因为温度变化（大概 100 度左右）造成的波长变化（大概 10 纳米）补偿，就可能实现无制冷可调谐激光器，使封装成本明显减低，器件价格甚至最终低于 70 美元都是可能的，这将为可调谐激光器的超大规模应用奠定良好基础。

2. 快速可调谐激光器

对于快速可调谐激光器，如果把 DFB 激光器阵列做得足够多，使阵列中的每一个激光器代表一个调谐波长，波长的调谐实际上就是这些激光器之间的开关切换。由于激光器点亮和关闭速度在 1 纳秒量级，且 DFB 激光器的模式稳定性特别好，抗环境变化能力很强，因此采用这样机制的可调谐激光器速度可以达到纳秒量级。虽然需要做很多激光器，但是只要把普通 DFB 激光器做好，就容易实现稳定的快速可调谐激光器。这样的快速可调谐激光器原理像集成电路，增加集成晶体管数目实现更高性能。如果需要集成更多快速可调谐激光器，只需要集成更多 DFB 激光器。这样机制下的快速可调谐激光器，由于集成单元激光器多，如果波长间隔误差大，会使波长控制变得特别复杂和无序，导致功耗、控制和测试成本明显提高，甚至完全不能满足正常使用要求，因此精准的波长控制几乎是必须的，REC 技术的精准波长控制和成本低廉的优点也因此可以发挥得淋漓尽致。这方面的初级样品已经研制出来并初步测试成功。

未来巨大网络的核心交换非常需要快速可调谐激光器，其对于光网络的重要性，就像 CPU 对于电子计算一样。2013 年华为全球首发的百亿兆全光交换原型机(PPXC)【<http://www.c114.net/news/126/a687710.html>】最终没有实现产业化，其中一个重要原因就是无法获得稳定的快速可调谐激光器。

综合上述，光子集成将和 IC 一样，是一个伟大的事业和产业。面对国外强大的竞争优势，无论自主高端 IC 制造、还是高端通信光子集成芯片制造，在中国很难找出商业上实现漂亮弯道超车的案例。非常幸运，REC 集成技术具有对波长微结构无以伦比的精准控制能力，这样就在关键性能上建立了一个难以逾越的制高点，使商业成功的可能性大增。如果这样的技术优势不能尽快转成产品优势，失去一次高端核心信息元器件实现商业突破的机遇，将是一个极大的历史遗憾。

本信的目的是以个人完全公开的方式，通过互联网这样一个颠覆性的媒介，让更多的人了解我们做的工作，期望借助于媒体巨大的力量，完全公开接受公众最大力度检验。在此基础上，能够找到一流的资金，打造一个集商业、管理和工艺人才为核心的一流团队，充分利用 REC 技术基于普通商业成熟 DFB 激光器制造平台就可实现对波长间隔无与伦比的精准控制优势，第一步踏踏实实掌握好二流或者准一流工艺，以低成本和快速可调谐激光器为突破口，实现自主高端光子集成芯片商业成功的梦想。

我个人也深深领会到，再好的技术，没有工艺支撑也无法产生价值，好的技术，结合越好的工艺，将产生越大的价值。而光芯片工艺也是我们国家的弱势所在。为了能够实现我参加第二届中国创新创业大赛中所追求的更大梦想：“**在集成电路上，主要享受了西方带来核心成果，在集成光器件上，努力让世界享受中国人带来的核心产业成果**”，需要付出更大的努力，需要更多人的关注、支持和参与，来解决发展中的问题，特别是工艺问题。因此，我个人希望在下一步工作中能够全身心投入到先进工艺开发中去。

我个人愿意以南京大学的教授职位作为担当，尊重承诺：**从现在开始，在原始专利到期的长达 10 年时间内，在激光器阵列波长间隔的大规模精准控制和制造上，与不和 REC 技术思路类似的其他技术相比，我们将一直保持明显优势，至少优于 2 倍。**

REC 技术可以像 IC 制造一样，只采用普通商业成熟光刻方法就能够在晶圆上制造各种复杂激光器，灵活性强，同时在波长微结构的精准制造上，更是难以逾越。从长远来看，这样的技术在未来大规模集成光芯片上具有广泛应用的潜力且可能产生更多令人惊喜的产品，限于篇幅等原因，不能充分说明。

为及时抓住一次可能实现自主高端激光芯片商业成功的历史性机遇，不留下遗憾，本公开信欢迎广泛传播和讨论，并完善本公开信，在广泛、严格的公众检验基础上，创造踏踏实实做好工艺等关键技术的机会。这里也尊重说明，与本公开信内容相关的责任完全由我个人全部承担。

衷心感谢一路走来所有关心和帮助我的朋友！

此致

敬礼

陈向飞

2016 年 11 月 1 日