

News & Highlights

用硅基激光器提高数据容量限制

Peter Weiss

Senior Technology Writer

2016年9月9日，全球互联网数据流量突破了每年1 ZB，即 1×10^{21} 字节（ 1×10^{12} GB）的里程碑。一位分析师估计，如果你想象每一个GB都是一块砖，那么 1×10^{12} GB将能够建造258座长城[1]。互联网花了近40年的时间才达到这一目标。到2022年，每年的互联网流量预计将达到5 ZB [2]。

面对日益增长的全球需求，科学家和工程师正致力于开发更强大的高数据速率技术来处理负载。激光是承载世界数字信息流的收发器的核心部件，但目前的设备还跟不上。然而最近，硅基显微激光器的原型被揭开，它展示了先进的设计特征，这些特征可以帮助技术跟上世界对数据的激增需求。

事实证明，硅激光器虽然制造难度大，但由于其以可承受的价格提供高数据容量的潜力，因此成为研究的焦点。这种新的原型将“低成本、高容量和低能量”结合于一身。“这是一个伟大的方向，”电气和计算机工程教授John Bowers说。在加州大学圣巴巴拉分校（UCSB），鲍尔斯领导着世界上最重要的实验室之一，研发用于光学电路（或称“光子学”）的激光和其他组件。他和他的团队在2019年2月20日发表于*Optica* [3]期刊上的一篇公开论文中描述了这种激光，它大约高 $3 \mu\text{m}$ ，宽 $3 \mu\text{m}$ ，长2 mm。

这不是Bowers第一次突破光子学原有的底线。早在2006年[4]，他的团队就推出了一种早期的硅激光器原型，当时的新闻报道称，这种激光器将导致廉价的“数据雪崩”普及家庭和广泛的计算创新[5]。随着芯片制

造商英特尔公司的商业化，这款具有里程碑意义的设备成为第一台用于大规模产品生产的硅激光收发器，仅过去几年里就有数以百万计的购买量[6]。

Bowers说，全球数据激增预计在短短几年内就会超过当今光子学设备的容量。在目前达到 $100 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ 级别的光子收发器的情况下，业界期望在未来两年内将其速度提高到 $400 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ ，并且在之后两年内再提高两倍或4倍[7]。Bowers说，大约4年后，这种新型激光器的特性将变得至关重要。

如今，数据中心（图1）迅速增长，仓库里堆满了数千台彼此连接的服务器，因特网和其他全球网络主要驱动着对收发机加速的需求，Bowers说。然而，预期的创新，如下一代（或称5G）移动电话技术，将需要在数据容量层面实现飞跃，就像新的激光演示的那样。Bowers说：“随着5G的广泛部署，与天线的互联将需要比现在更高的容量，这便是这项技术的机会。”

新的原型实现了 $4.1 \text{ Tb} \cdot \text{s}^{-1}$ 的信息承载能力。该设备能同时传输64个不同的波长，且每个波长都有自己的信息流，这归功于一个叫做锁模的特性。这些特性使新型光源能够支持“可能是目前世界上最高的数据传输能力，”Di Liang说。12年前，Liang是Bowers公司的博士后，现在他作为惠普实验室的高级研究员，正在研究如何改进超级计算机组件之间的连接。惠普实验室位于美国加利福尼亚州的帕洛阿尔托，是惠普公司（世界领先的超级计算机制造商之一）的一个部门。

由于硅本身是弱光发射器，光子学制造商通常用高



图1. 在瑞士日内瓦附近，为欧洲核研究组织庞大的粒子物理实验室（CERN）服务的数据中心的内部情况。为了处理与世界各地的这些数据中心之间及数据中心内激增的流量，光子学产业计划每两年将基于激光的收发器的数据容量翻一番或翻两番。图片经许可来自：©Rob-ert Hradil and Monika Majer/ProStudio22.ch, CERN。

性能的光发射物质（即III~V族化合物）在硅上制造激光，这是根据元素在元素周期表中的位置决定的。这种化合物的例子包括砷化镓、砷化铟和砷化铝镓。将III~V激光器与硅紧密结合，使光子学制造商能够利用硅基电子产品庞大的设计、制造和测试基础设施，大规模生产高容量和低成本的光子芯片。

为了在原子级（或称“单片集成”）上实现激光材料和硅之间的安全和有效耦合，Bowers的团队使用一种叫做分子束外延（MBE）的过程，在硅上直接制造了新的激光器原型。这涉及一种将不同分子或原子的多束光束引导到硅衬底上的装置，硅衬底在不同的生长阶段被加热到500~580 °C之间的特定温度。通过利用MBE，研究人员一次能够制造出一个原子层的原型设备。

Bowers和他的团队努力克服的问题之一是在单片集成过程中出现的称为位错的结构缺陷。这些缺陷是硅和III~V族化合物晶体晶格与热膨胀系数的不匹配所造成的，从而导致激光器的性能降低。在 $4.1 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$ 的激光器中大幅降低位错浓度能够使其在室温下表现良好。但是，商业应用中的光子学组件必须能够耐受主要由电子电路产生的热量，而“典型的商用光收发器最高可在80 °C下正常工作，”Liang说。Bowers乐观地认为，在减少位错方面取得的进一步进展，将使新的激光器原型在商用产品产生这类需要之前即可达到这一标准，而这大约还需要4年。实现可靠的80 °C性能“将为成功的商业应用扫清最后的障碍，”Liang说。

含有铟和砷原子的尖端纳米晶体称为量子点[8]，其被用作器件的光子源（或增益介质）。大约200万个纳米结构（图2）占据了9层III~V族化合物薄层中的

一层，它们组成激光器并遍布整个设备。电流刺激点发出被结构放大的光，并输入波导中。当今的商业收发器中的激光通常从所谓的量子阱中提取光，而非使用量子点，其中量子阱是用超薄的复合半导体制成的。但量子点受位错的影响又远小于量子阱。再加上点阵锁模和对反射的低敏感度，使得隔离器这一昂贵的元件变得不必要，这也将帮助量子点取代商业传输中的量子阱，Bowers说。

纽约市哥伦比亚大学光波研究实验室主任、电气工程教授Keren Bergman说，量子点激光器与硅集成，并发射像新的 $4.1 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$ 器件这样丰富的波长，能够产生更紧密的光子和电子电路。Bergman说，电子电路和光电路的融合可以缓解现有系统中的数据通信瓶颈，这使得新型激光器“在光学，特别是硅光子学方面，可能会改变其将如何在未来的数据中心和高性能系统体系结构中使用的游戏规则。”

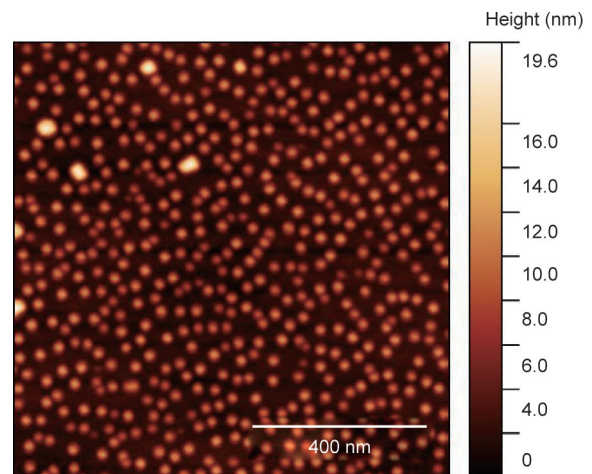


图2. 砷化铟量子点的原子力显微镜图像，如那些作为新型 $4.1 \text{ Tb}\cdot\text{s}^{-1}$ 硅激光器的光子源（或增益介质）的量子点。标度用颜色表示（从页面向上的一个轴上）点的不同部分有多高。这些残端状纳米晶体是通过分子束外延制成的，在激光中被压扁成圆盘。图片经许可来自：Justin Norman/Bowers' group/UCSB。

References

- [1] Barnett T Jr. The Zettabyte Era officially begins (how much is that?) [Internet]. San Jose: Cisco Systems, Inc.; 2016 Sep 9 [cited 2019 Jul 26]. Available from: <https://blogs.cisco.com/sp/the-zettabyte-era-officially-begins-how-much-isthat>.
- [2] Cisco Systems, Inc. Cisco Visual Networking Index: forecast and trends, 2017–2022. San Jose: Cisco Systems, Inc.; 2019.
- [3] Liu S, Wu X, Jung D, Norman JC, Kennedy MJ, Tsang HK, et al. High-channelcount 20 GHz passively mode-locked quantum dot laser directly grown on Si with 4.1 Tbit/s transmission capacity. *Optica* 2019;6(2):128–34.
- [4] Fang AW, Park H, Cohen O, Jones R, Paniccia MJ, Bowers JE. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser. *Opt Express* 2006;14(20):9203–10.
- [5] Markoff J. A chip that can transfer data using laser light [Internet]. New York: The New York Times; 2006 Sep 18 [cited 2019 Jul 26]. Available from: <https://www.nytimes.com/2006/09/18/technology/a-chip-that-can-transfer-data->

- usinglaser-light.html?auth=login-email.
- [6] Alcorn P. Intel demos its first 400GbE silicon photonics transceiver, outlines design [Internet]. Tom's Hardware; 2019 Apr 12 [cited 2019 Jul 30]. Available from: <https://www.tomshardware.com/news/intel-silicon-photonics-transceiver-400g,39028.html>.
- [7] Cheng Q, Bahadori M, Glick M, Rumley S, Bergman K. Recent advances in optical technologies for data centers: a review. *Optica* 2018;5(11):1354–70.
- [8] Franchi S, Trevisi G, Seravalli L, Frigeri P. Quantum dot nanostructures and molecular beam epitaxy. *Prog Cryst Growth Charact Mater* 2003; 47(2–3):166–95.