

# 设计低功耗光开关 应对日益增长的网络流量

为了推动通信技术和高性能计算产业的发展，华为技术有限公司加拿大分公司正致力于研发热光型硅光开关。借助仿真分析对设计进行优化，力图最大程度地提升光开关的转换速度，同时将器件的功耗降至最低。

作者 JENNIFER SEGUI

早在数十年前，研究人员就设想过全光学传输网络，希望利用其高速传输的潜力来满足人们对网络性能不断增长的需求。目前，光开关已经被广泛部署在城际网络和远程网络中，数据中心的相关实验及高性能计算的研发也正在持续地同步推进中。华为技术有限公司加拿大分公司（以下简称“华为”）正在研究如何利用硅光（SiPh）技术从根本上提升核心光学元

件（如光开关）的性能。

光学网络利用光波进行数据传输，拨打电话、处理搜索请求或电子邮件都是光学网络常见的用例。网络中的各个点之间要进行数据传

输，传统方法是先将光信号转换成电信号，完成交换后，再将电信号重新转换回光信号（见图 1）。转换信号时需要使用大型高耗电设备，这会导致每转换一个数据包都会增加延迟时间。相比之下，光开关无需转换信号格式，因此这种开关往往交换更加快速、尺寸更加小巧，并且具有更低的功耗。

然而，目前的光开关不仅体积庞大，而且价格昂贵，许多元件还需要人工组装。为了解决这些问题，华为正在利用集成硅光技术开发一种新型光路，这种光路是在 CMOS（互补金属氧化物半导体）芯片代工厂中进行生产的。这项技术得以实现是因为硅在信号波长范围内是透明的。

华为的开发人员们正借助集成设计环境来制作一些世界上最复杂的硅光路原型机。在整个迭代的原型开发周期中，开发人员会不断调整数值物理模型以提高其精度，同时还借助光路设计软件来确保芯片设计可一次成功。热光型硅光开关的热力学性能分析是整个设计工作流程的核心环节。

## 采用相移型热光开关 交换数据

研发中的热光开关是一种硅光马赫-曾德尔（Mach-Zehnder，简称 MZ）干涉仪，具有交叉和直通两

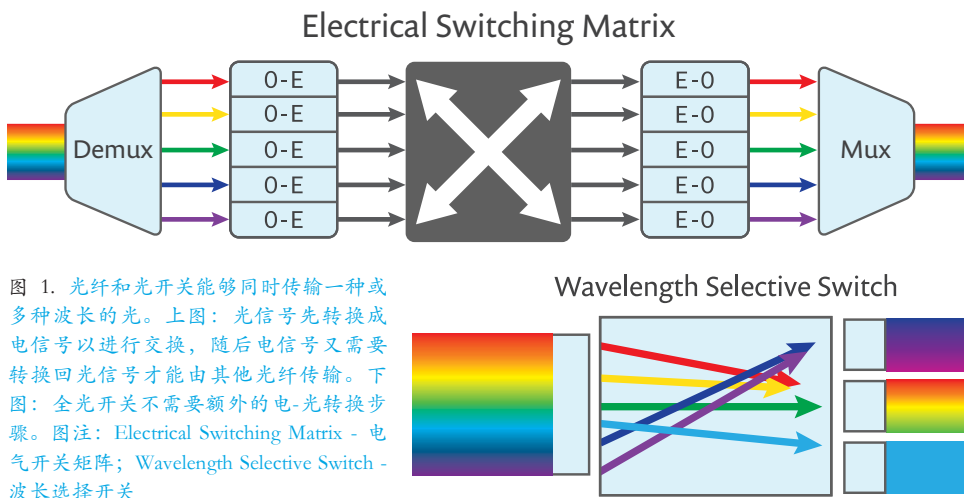


图 1. 光纤和光开关能够同时传输一种或多种波长的光。上图：光信号先转换成电信号以进行交换，随后电信号又需要转换回光信号才能由其他光纤传输。下图：全光开关不需要额外的电-光转换步骤。图注：Electrical Switching Matrix - 电气开关矩阵；Wavelength Selective Switch - 波长选择开关

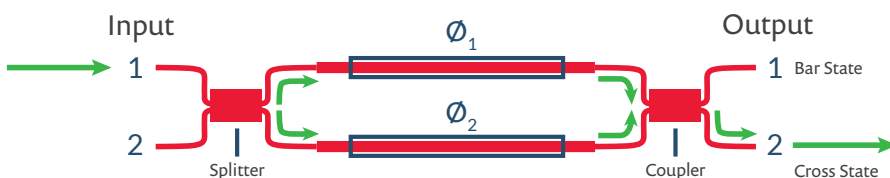


图 2. 在 MZ 干涉仪中，光进入输入波导后被分成两束并分别进入两个支臂，光波会根据每个支臂的光学特性在其中产生相移。耦合波会在输出端口发生相长干涉和相消干涉，分别表示光开关的交叉态和直通态。绿色路径显示的是开关的默认状态。图注：Input - 输入；Splitter - 分流器；Output - 输出；Coupler - 耦合器；Bar State - 直通态；Cross State - 交叉态

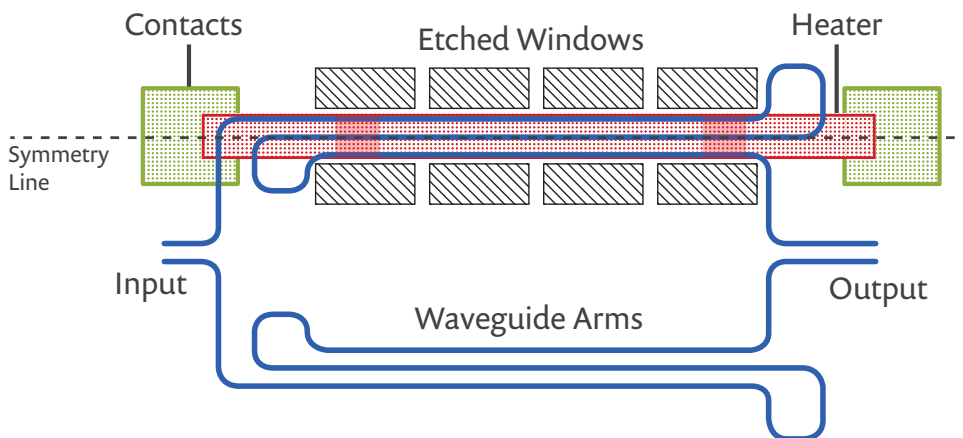
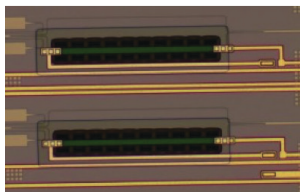


图 3. 上图为具有热下切的热光 MZ 移相器示意图，其中一条波导臂（蓝色）上方安装了电阻加热器（粉色阴影区域），用来改变折射率，从而使光波在传播时产生相移。下方的照片显示了加热波导的实物图。图注：Symmetry Line - 对称线；Contacts - 接触；Input - 输入；Etched Windows - 刻蚀窗口；Waveguide Arms - 波导臂；Heater - 加热器；Output - 输出



种状态。默认情况下，MZ 干涉仪处于交叉状态（见图 2）。光波在到达输入端口（如端口 1）时被分成两束，并沿两条支臂传播。当两支臂中的光在到达输出耦合器时会发生干涉，其相对相位导致最终所有的光都会从输出端口 2 输出。

热致相移为我们提供了一种切换开关状态的方式。通过对其中一条支臂进行加热，可将 MZ 热光开关切换到直通态。加热过程可以改变波导的折射率，从而使在这条支臂中传播的光产生  $\pi$  相移。干涉作用使得光从输出端口 1 输出，由此将数据传送到不同的目的地。通过将大量的开关单元集成到单个芯片上，可以制造一个大型的开关矩阵。

图 3 展示了华为的 MZ 开关设计。当光进入开关后，在两条折叠的波导臂（蓝线表示）中被分成两束。其中一条支臂上配备了氮化钛（TiN）电阻加热器，图 3 中用粉色阴影区域表示。在对接触电极施加电压后，加热器底层波导的温度将会升高并产生  $\pi$  相移，从而引起开关状态的改变。三折波导可以增加加热器与波导相互作用的距离，如此一来，便能将效率提升至原来的三倍。

图 3 中展示的热光开关的加热波导臂是一种悬挂结构，通过刻蚀掉其周围的包层材料，形成了热下切（thermal undercut）。图 4 显示了有热下切和无热下切时的加热波导臂的剖

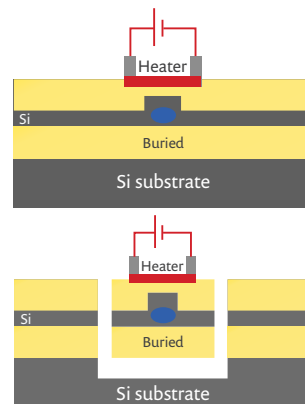


图 4. 上图和下图分别显示了无热下切和有热下切的 MZ 热光开关的加热波导臂剖面图。热下切可以将波导和加热器隔开，从而减少热量向周围材料的散失。图注：Heater - 加热器；Buried - 埋层；Si substrate - 硅衬底

面图。热下切可以防止向底层基板传热，促使加热器对掩埋式波导的升温效率提高 23 倍，并因此减少了 96% 的功耗。

### » 热分析和设计优化

不仅要同时满足功耗、交换速度及尺寸的要求，还需要考虑热下切的制备设计规则，这使得对 MZ 热光开关进行优化面临着很大的难题。为了确定最终设计，研究人员借助 COMSOL Multiphysics® 软件的热分析能力，能够在

制造物理原型之前对创新设计进行有效的定量评估。

“在产品进行大规模量产之前，我们需要对设计进行彻底的优化。在这一过程中，每毫瓦的功耗都不容小觑。”华为高级研发工程师 Dritan Celso 说道。鉴于此，他们在硅光器件的集成设计环境中启用了 COMSOL® 软件。

举个例子，热分析被用来对不同热光设计的性能进行量化分析。因为热下切的存在会给制造过程增加额外的步骤，所以是否在热光设

“在产品进行大规模量产之前，我们需要进行彻底的优化工作，在这一过程中，每毫瓦的功耗都不容忽视。”

— DRITAN CELO, 华为高级研究工程师

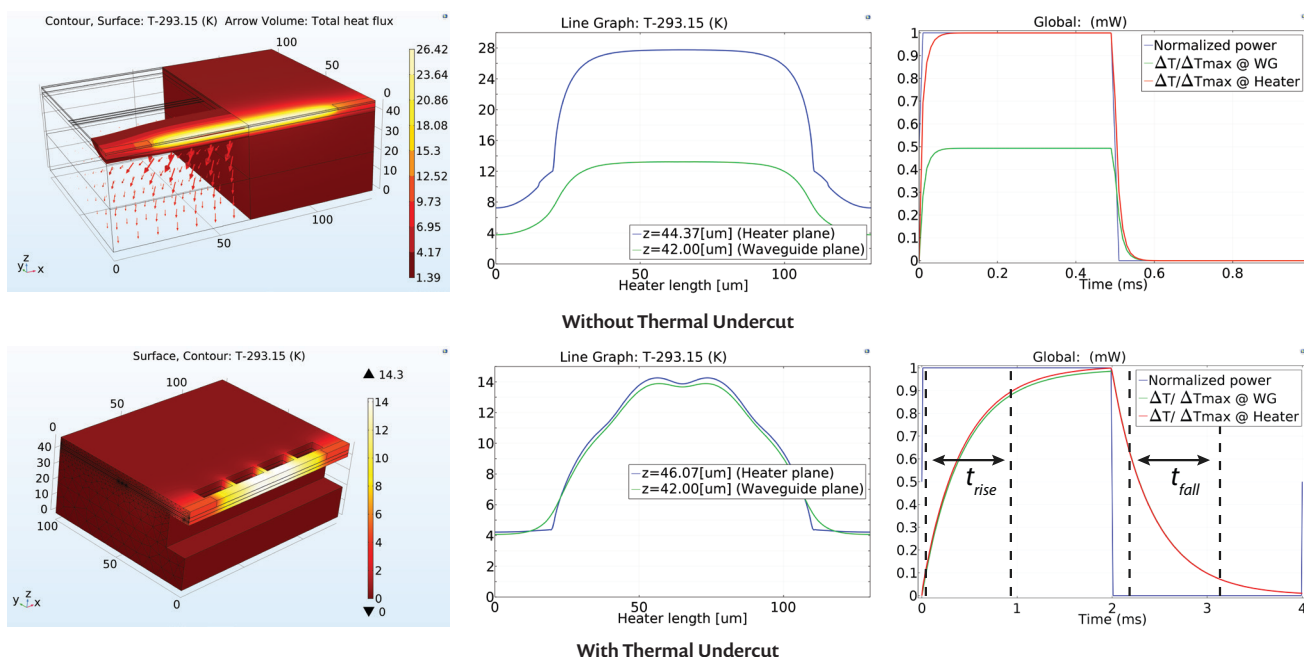


图 5. 利用 COMSOL Multiphysics® 软件建立的热光开关模型，上三张图和下三张图分别显示了无热下切和有热下切的情况。左侧的两张模拟图显示了稳态温度分布、中间的两张图谱显示了加热器与波导之间的温差、右侧两张图谱显示了波导达到目标温度所需时间的瞬态分析。图注：Without Thermal Undercut - 无热下切；With Thermal Undercut - 有热下切

计中加入热下切成为了一个需要被着重考虑的因素。另外，尽管使用热下切有助于减少器件的功耗，但同时会降低交换速度，所以具有下切的器件几何结构只适用于一些特定的应用领域。

图 3 中显示了在 COMSOL® 软件中绘制的器件几何结构，其中包括无热下切和有热下切这两种情况。为了缩短每次设计中稳态热分析所需的计算时间，基于结构的对称性（在图 3 中以黑色虚线表示），研究人员仅使用了对称结构的一半。生成的几何结构模型见图 5（左侧的两张图），长度为数百微米的硅波导嵌在硅衬底顶部的二氧化

硅中。软件中提供了大量的材料属性选项，研究人员可以方便地从中选择适当的材料属性来定义模型的各个域。由于硅光结构高度的深宽比为 1000:1，因此 COMSOL Multiphysics® 提供的网格剖分算法是快速准确建模的关键。

研究人员对整个器件几何结构中的固体传热进行了建模，对表面钝化层和热下切边界（仅针对有热下切的设计）定义了绝热边界条件。他们将加热波导臂中的氮化钛加热器定义为开关模型中的热源，仿真结果显示了使特定设计产生  $\pi$  相移需要施加的热能。为产生  $\pi$  相移，波导温度必须以 13.3 K

为单位变化量——这一数值是由光学测量实验确定的。

热光型硅光开关的稳态分析表明，当设计中存在热下切时，实现  $\pi$  相移的功耗可降低 23 倍。图 5 中左侧的两张模拟图显示了每个器件中的温度分布情况。中间的两张图谱显示了加热器与波导之间的温差，同时表明了无下切器件向周围材料散热的程度。与无下切设计中 13 K 的温度差相比，具有下切的设计中温度差仅为 0.2 K。瞬态分析采用了对称结构的四分之一，用于进一步缩短计算时间。瞬态分析揭示了将波导调节

到期望温度和相位所需的时间，该时间的长短限制了器件在交叉态与直通态之间的切换速度。尽管有下切的器件更加节能，但它们的调节速度却比不上无下切的器件。图 5 中右侧的两张图谱中显示的上升和下降时间就说明了这一点。

在评估二氧化硅层的厚度、MZ 开关的外形尺寸、器件顶部钝化层的冷却效应等方面的过程中，通过验证的稳态和瞬态模型同样起着至关重要的作用，使器件最大限度地受益于功耗的降低。

### » 成千上万的开关集成在单个芯片中

尽管传热仿真的主要目



的是针对单个 MZ 热光开关进行优化，然而在实际应用中，这些开关并不会单独出现，而是用来组成大型的开关阵列（见图 6）。华为研究人员设计这个阵列的目的是为了防止光学串扰，以确保从开关发出的光信号清晰准确。图 6 的上图显示的架构表示一个“32×32”硅光开关阵列，其中包含 448

个“2×2”的 MZ 热光开关单元。每列中都有一条光路穿过其中的一个单元，通过对这些单元施加适当的交叉或直通驱动功率可对光路的路径进行定义。对开关供电会使底层波导升温并产生必要的  $\pi$  相移，从而使信号沿选定的路径传播。

图 6 中下图显示了“32×32”开关阵列的实体

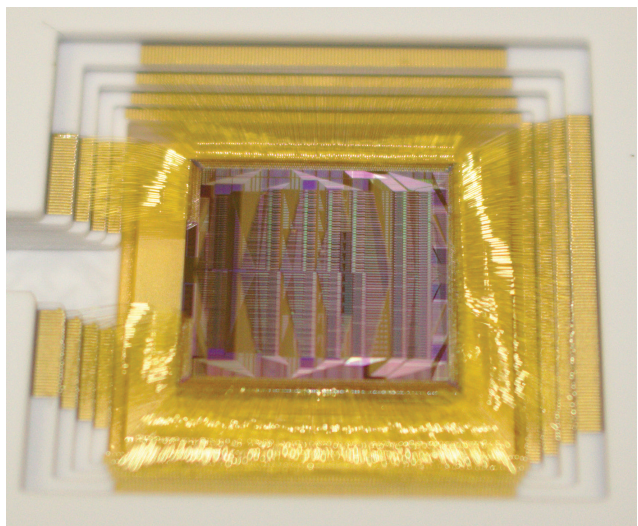
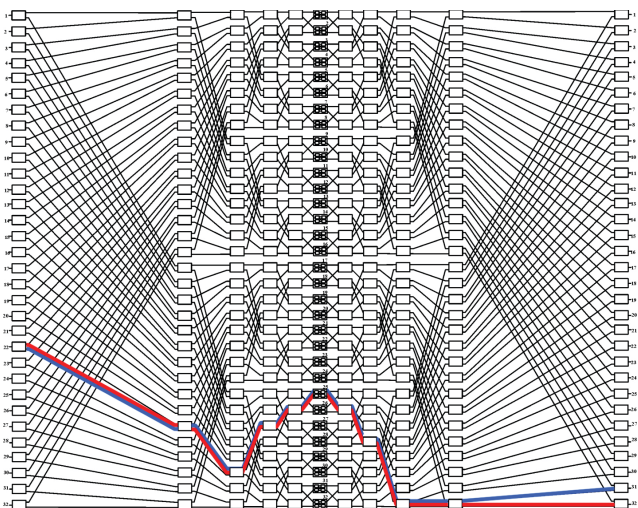


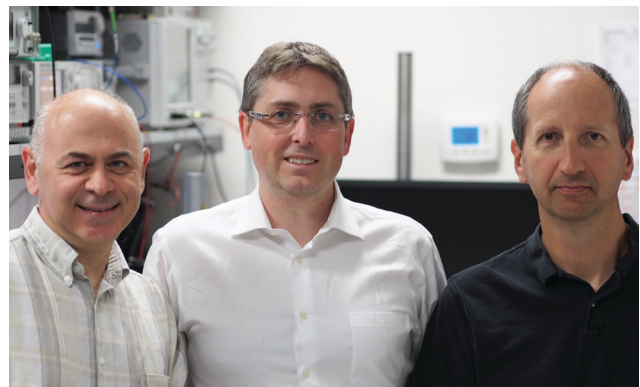
图 6. 上图显示了包含 448 个“2×2”热光 MZ 单元的“32×32”开关阵列，下图显示的是制作原型机，其中的每个单元都在芯片上集成了监控光电二极管。

制作原型，它由具备使用热下切技术来制造硅光器件经验的 CMOS 代工厂生产。这个原型的每个单元都在芯片上集成了监控光电二极管，其目的是用来确定交叉或直通驱动电流。这一原型的实现标志着该研究工作取得了重要进展。

进入原型设计和产品大规模量产阶段后，设计者们又迎来了新的挑战。他们需要在华为内部研发中心和代工厂之间合理分配时间。

“热力学性能虽然只是一个很小的方面，但却是整个器件设计工作流程中的一个重

要环节。”Celo 解释道，“产品的大规模量产阶段即将到来，在制造‘128×128’硅光开关的过程中，要将成千上万的 MZ 单元集成在单个芯片上，同时功耗还需控制在 50 W 以内。并且生产出来的开关可能会在不同的环境中使用，这又对产品的机械稳定性提出了要求。目前，对封装开关的结构分析成为了我们关注的焦点。我们将继续利用 COMSOL® 软件的数值仿真功能对设计进行优化，相信这个软件将再次成为我们工作中不可或缺的一部分。”



华为技术有限公司加拿大分公司先进光子学团队成员：Dritan Celo、Eric Bernier 和 Dominic Goodwill。

## 参考文献

D. Celo, D. J. Goodwill, J. Jiang, P. Dumais, C. Zhang, F. Zhao, X. Tu, C. Zhang, S. Yan, J. He, M. Li, W. Liu, Y. Wei, D. Geng, H. Mehrvar, E. Bernier. *32x32 Silicon Photonic Switch*, presented at *Optoelectronics and Communications Conference/International Conference on Photonics in Switching, Niigata, Japan 2016*.

D. Celo, D. J. Goodwill, J. Jiang, P. Dumais, M. Li, E. Bernier. *Thermo-optic silicon photonics with low power and extreme resilience to over-drive*, presented at *IEEE Optical Interconnects Conference, San Diego, CA 2016*. DOI: 10.1109/OIC.2016.7482994, IEEE.