

关于光计算的报告

杨佳宇 1800011409

摘要: 光计算是一种新型的前沿的计算技术, 通过光子芯片来实现。本文介绍了光子芯片和光计算的概况, 并分析了全光芯片的实现方式, 着重介绍了全光逻辑门, 也简单介绍了全光并行计算。最后适当分析了光计算和全光芯片的前景。

关键词: 光计算 全光芯片 全光逻辑门

1 光计算及光子芯片概述

1.1 电子芯片与光芯片

在微电子领域, 电子芯片在过去 50 年发展迅猛, 人们也总结出了摩尔定律: 当价格不变时, 集成电路上可容纳的元器件的数目, 约每隔 18-24 个月便会增加一倍, 性能也将提升一倍。但是, 微电子芯片的信息处理速率最高也只能达到 Gbit/s 的量级, 同时, 芯片内部在运作的时候存在不可避免的热效应, 这些都对微电子芯片的在未来的发展产生了极大的限制, 摩尔定律也将面临其“天花板”。

近年来, 人们开始关注提高芯片性能的新思路, 光子芯片也就成了人们关注的焦点之一。通俗地讲, 光子芯片就是用光子来替代传统微电子芯片中的电子, 来进行各种运算。理想的情况下, 光子芯片处理信息的速率可以达到 10^3 TBit/s, 这一上限是远远大于传统微电子芯片的。此外光子在芯片中传导的热效应相对电子来说微乎其微。目前虽然光纤在信息传输上已经非常普及, 但是由于光纤输入端和输出端都是接有光电转换器, 所以端口的转换速率极大的限制了光纤的传输速率, 但如果我们日常生活中所有的处理器中都是光子在运作, 那就无需再进行光电转换, 因此也可以打破对光纤传输的限制。可见光子芯片的研发与普及将会给我们的生活带来质的飞跃。目前光子芯片的研究主要包括光电结合芯片和全光芯片, 但人们最终的目的自然是摆脱电子的束缚, 做出一个性能良好的全光芯片。而各国的科研团队也都在达到这个目标的道路上不断努力着。

1.2 光计算的基本实现途径

就目前来看, 光计算有两个实现途径。其一, 是利用光子的自旋特性, 比如将左旋规定为二进制“0”, 将右旋规定为二进制“1”, 一切元器件都以调制光子的自旋为主要目的; 其二, 是利用光的功率, 事先设定一个阈值, 光的功率大于该阈值的时候为二进制“1”, 光的功率小于该阈值的时候为二进制“0”, 元器件的设计主要以调制特定波长的光的能量传输效率。人们目前的研究焦点在于后者, 而实现后者的方式也是多样的, 比如通过对光子晶体的结构设计以得到特定的能带结构, 再比如利用非线性光学效应、基于光学微腔的结构设计等。

2 全光逻辑门的实现

传统的微电子芯片中包含了若干基本的逻辑门电路，通过一步步简单的逻辑运算来达到芯片最终的相应计算目的。与此相应，对光计算的研究也应当基于全光逻辑门的实现。目前人们对全光逻辑门的研究也已经取得了一定成果。

2.1 反向设计

正如在 1.2 中所涉及，目前研究焦点在于将光功率转换为二进制“0”“1”，通过设计元件结构来控制一定输入功率下的输出功率。虽然全光逻辑门的实现可以基于不同材料、光子晶体，可以基于不同原理，比如光场分布中的干涉、二阶或是三阶非线性光学原理等等，也可以基于特定的结构设计，比如光学微腔或是更特殊的波导排布网络结构。但为了实现全光逻辑门，都是要完成一个“反向设计”的过程。

所谓反向设计，简单的说就是来设计这个元件的结构，调整其中各个参量，来实现一定功能和目的。我们已有的物理知识可以帮助我们在已知结构的情况下计算出它对应的特性，并基于特性赋予其功能。但是反向设计要求的是先从功能反推实现这一功能所要求的特性，再根据这一特性反推出什么样的设计结构和参量可以实现这样的特性，一般而言这也是最困难的一步。因为由已知结构和参量推算特性的过程本就因为结构的复杂性而显得复杂，我们往往只能进行数值模拟，或是制作相应的结构，并通过实验测量其特性。所以由特性反推结构和参量就变的更为复杂。人们甚至不知道从结构参量到特性的这一个映射是否是可逆的。换言之，人们甚至不知道在设计区域内，是否一定有一个结构和对应的一组参量可以得到期待的特性，即期待的特性是否一定可以实现。

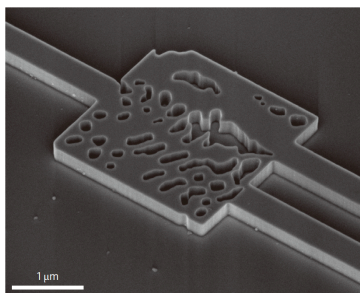


图 1: 宽带波长分路器设计图

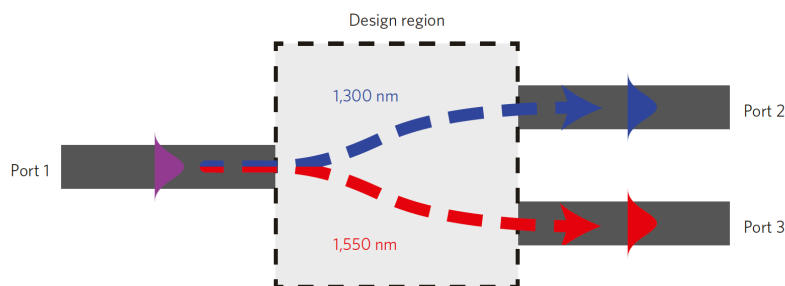


图 2: 宽带波长分路器功能示意图

目前来说，反向设计需要在数值模拟的基础上，再通过对结构的认为设计和一定算法来实现。首先需要要有对结构的设计，比如在一个 $20\text{ }\mu\text{m}\times 20\text{ }\mu\text{m}$ 的方形的以二氧化硅为底座的硅层上，进行一定深度的刻蚀，一端是输入波导，一端是输出波导。如图 1 和图 2 所示，为一个基于这一设计的宽带波长分路器。^[4] 只有有了设计，才能从设计中确定出我们操控的变量。在刚才的例子中，在方形区域的哪些地方刻蚀、刻蚀深度、硅层厚度、刻蚀后填充的材料等等。不过可以在设计中预先给定刻蚀深度、硅层厚度、刻蚀后填充的材料等，但在哪些地方刻蚀是这里最难确定的。这就需要抽象出参量来，比如可以将这个区域划分成 100×100 的网格，取 10000 个二进制数作为参量，每个数代表一个网格的刻蚀情况，如“1”代表刻蚀，“0”代表不刻蚀。随后就需要借助一定的算法了。每给定一组参量都可以计算出对应的原件特性，就可以借助算法来将这个特性作为反馈来调整输入参量，不断进行计算，最终将输入参量优化到最理想的状态。所以光计算的实现离不开反向设计，而这个过程其实也是需要特定算法的支撑的。

在这个过程中，结构设计其实是最困难的，刚刚的例子只是一个极其简单的结构设计，但这个结构并不一定可以很好的实现期待的特性和功能，因此需要不断调整结构设计的思路，而这目前是无法通过计算机来辅助人们实现的，需要的是个人的感受和经验以及一次又一次的失败与反省。

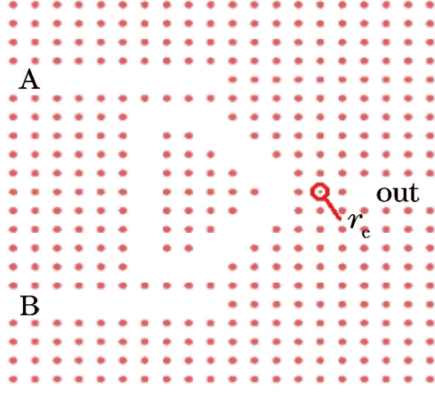


图 3: 二维光子晶体“与”门设计图

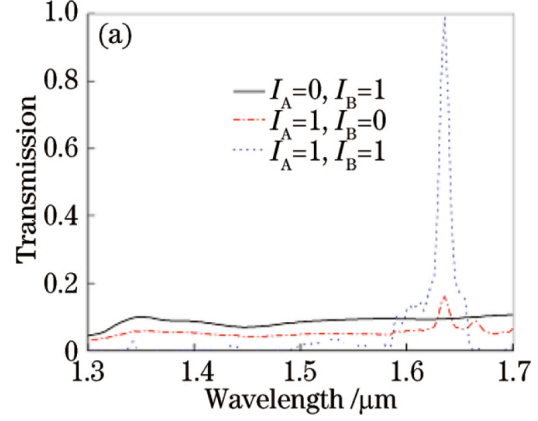


图 4: 全光“与”门不同输入下的透射谱

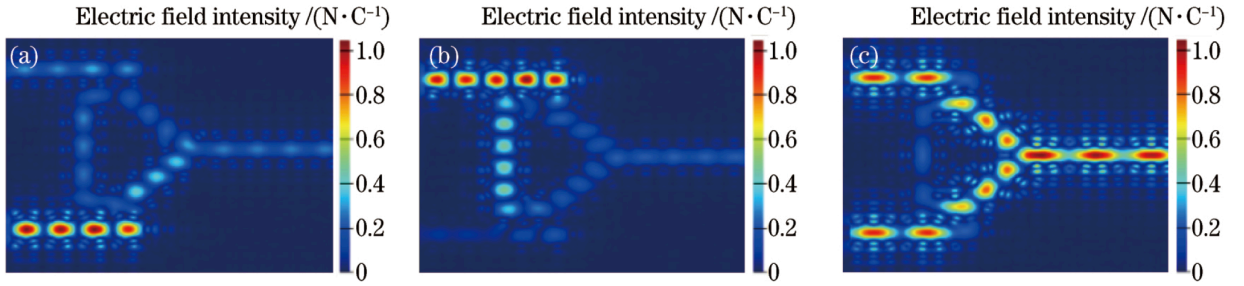


图 5: 全光“与”门不同输入下的场分布图

2.2 基于二维光子晶体的“与”门实例

正如 2.1 中所提到的，实现全光逻辑门可以基于不同的材料、原理等，在这里以二维光子晶体为例来展示一个全光“与”门的设计结果。^[5]

图 3 中是一个设计后的二维光子晶体结构。在空气中填充正方晶格排列的硅介质柱以构成二维光子晶体结构，介质柱折射率 $n = 3.4$ ，晶格常数 $a = 0.55 \mu\text{m}$ ，介质柱半径 $r = 0.0982a$ ，器件尺寸为 $11 \mu\text{m} \times 11.55 \mu\text{m}$ 。并在设计中挖去一部分介质柱，最终得到了图中的结构。图中有两个输入端口和一个输出端口，作为“与”门，期望在两个输入端口分别单独输入的时候几乎没有输出，两个输入端口同时输入的时候才有输出。在经过数值模拟后得到在特定波长不同输入情况下的场分布图，如图 5 所示。可见这一设计很理想地满足了我们的需求。同时可以看到在不同输入模式下的不同波长透射谱，如图 4 所示。从透射谱中可以看出只有在特定波长下“与”门的实现效果才是最好的，但因为其透射谱的峰很窄，所以输入光波可以包含一个波段内的各波长成分，并不影响“与”门的效果。

根据透射率数据也可以给出这一“与”门的真值表，如表 1 所示。

表 1: 全光“与”门真值表

I_A	I_B	Output Logic	Transmittance
0	0	0	0
0	1	0	0.1330
1	0	0	0.1621
1	1	1	0.9895

3 全光并行计算

全光芯片虽然原理和传统微电子芯片不一样，但从结构上分析貌似都是从逻辑门出发再进行进一步组合。然而，因为光子与电子的特性不同，光计算有着一个更为独特的优势，就是并行计算。对于“并行计算”的概念普遍上存在一定争议，这里全光并行计算的含义是指通过同一个器件可以同时进行两种逻辑运算。

光子的功率（即光强）和电子的能量（即电压）都在器件设计中被转换为二进制“0”“1”代码，但光子不同于电子的是它还有额外的特性，波长特性。也就是说我们可以利用这一特性，使得一个器件对某一波长实现某种逻辑运算，对另一波长实现了另一种逻辑运算，这样一来，输入一个波段的光，即可通过一个器件快速的同时进行两种运算。从图中也可以看到，这一设计对峰值处的波长可以实现“与”运算，可以在这一基础上调整设计，在对原本“与”门的效果损失不算太大的前提下实现对另一波长的另一运算。尽管在这一例子中并不能确保理想的设计是存在的，但可以改用其他原理，用其它的结构设计来试图实现全光并行计算。

全光并行计算现在仍未有很理想的设计，人们也仍在这条路上不断的总结，不断的探索，但可以肯定的是，全光并行计算的实现可以让全光芯片在最终的集成率和尺寸上达到传统微电子芯片所不能突破的极限。

4 前景展望

当今人们在不同结构、不同原理下都做出了很不错的全光器件，最近关于全光神经网络的研究也取得了一定的成果，但是，全光并行计算器件的设计仍没有一个很好的结果。不仅如此，在各个器件的设计都达到了理想的结果之后，怎么将各个器件集成到一个小小的芯片上似乎还是未知的，在这中间也会面临很多新的困难和考验。

光计算是一个正在慢慢发展的领域，虽然它所用到的基本物理原理在现在已经不算新颖，但是这一领域对设计性的要求极高。各个国家，包括我国在内，都把它作为国家重点研究项目之一。甚至包括一些企业，比如华为、英特尔等也都在招募一批科研人员在这一领域持续推进。虽说人们在这一领域只是迈出了几小步，离一个理想的全光芯片的制成似乎还很遥远，但可以预见，那一天到来的时候，计算机将面临一次彻底的革新，我们的生活也将发生天翻地覆的变化。

参考文献

- [1] Feldmann, J., et al. (2019). "All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities." *Nature* 569(7755): 208-214.
- [2] Goudarzi, K. (2017). "A Novel Proposal for an All-Optical "and" Logic Gate Using Two-Dimensional Photonic Crystals." *Journal of Russian Laser Research* 38(5): 459-464.
- [3] Molesky, S., et al. (2018). "Inverse design in nanophotonics." *Nature Photonics* 12(11): 659-670.
- [4] Piggott, A. Y., et al. (2015). "Inverse design and demonstration of a compact and broadband on-chip wavelength demultiplexer." *Nature Photonics* 9(6): 374-377.
- [5] Zhen Liu, L., et al. (2019). "Design and Simulation of Two-Dimensional Photonic Crystal All-Optical Logic Gates." *Laser & Optoelectronics Progress* 56(18).
- [6] <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=63226>