

光子计算方法及光子计算阵列、光电混合计算方法及阵列

优先权申请

[0001] 本申请要求 2023 年 04 月 27 日提交的中国发明专利申请【申请号：CN2023104732135】、【发明名称：通过光子计算单元在光域中进行运算的方法】；以及 2023 年 06 月 07 日提交的中国发明专利申请【申请号：CN2023106690334】、【发明名称：用于片上大规模矩阵乘法运算的光子计算阵列】；以及 2023 年 08 月 02 日提交的中国发明专利申请【申请号：CN2023109655493】、【发明名称：用于片上大规模矩阵乘法运算的光电混合计算方法及阵列】的优先权，该优先权发明专利申请以引用方式全文并入。

技术领域

[0002] 本发明涉及基于光学的计算技术领域，尤其涉及一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，以及基于该光子计算单元的光电计算阵列和光电混合计算方法及阵列。

背景技术

[0003] 随着先进芯片工艺日益趋近物理极限，集成电路的发展面临重大挑战。新材料、新器件、新原理和新架构等技术的协同创新和突破，是应对微电子领域挑战的重要途径。与此同时，基于人工智能的自然语言处理、图像识别、自动驾驶等新兴技术的快速发展，是以大量计算资源和能耗为代价的。人工智能的广泛应用亟需发展低功耗、高性能的新型计算机硬件和系统，对集成电路技术提出了更高的要求。以硅基光电子技术为基础的光子计算芯片，使用与集成电路兼容的材料和工艺，在光域进行信息传输和处理，具备更快的速度、更大的带宽和更低的能耗，是解决集成电路面临的性能瓶颈和信息拥堵的有效途径。

[0004] 在光子计算芯片中，光在波导中进行传输、计算，具有集成度高，能与传统电子芯片兼容等优势，备受广泛关注。现有的光子计算芯片技术路径为：利用马赫-曾德尔干涉仪（MZI）或微环结构（MMR）结构实现光子计算。但会存在以下不足：一是单个计算单元（MZI 结构）在 $200\sim 300\mu\text{m}$ 左右，为了达到 π 相位的变化，需要百微米长度，导致计算单元尺寸较大、集成度较低；二是其调制方法主要为利用基于硅基光电子技术的热光调谐原理或电光调谐原理，调制速度较慢；三是该方法在调制时存在温度漂移的现象（MMR 结构尤为显著），会对光波导的折射率造成影响。

[0005] 另一方面，超快的数据处理需求对计算机系统的算力和速度等要求越来越高。随着摩尔定律逼近物理极限，电子芯片在计算速度和功耗方面遇到了极大的挑战。传统的矩阵运算，例如中国专利 CN111158636 揭示，需要计算机对计算数据的中间量进行多次存储和读取，随着矩阵规模的扩大，计算时间也成倍增长，人们开始寻求一种可以高效实现大规模矩阵运算的运算方法。

[0006] 光子计算结构具有高速、并行等特性，在处理线性计算上有突出的优势，成为当前国际研究的一个热点。人们采用光波导微纳结构、微透镜阵列等新型光学材料搭建光子计算芯片，应用到不同场景中。

[0007] 以光学器件为基本单元，构建光子器件网络化的光子计算芯片，可以利用高速并行、低功耗的光子作为信息的载体，被认为是未来高速、超大规模、大数据量、人工智能计算及类脑计算最具有前景的方案，有望推动新一轮产业革命。硅基光电子技术利用光子在速度、带宽和抗干扰方面的独特优势，同时具有与 CMOS 工艺兼容的集成工艺，可以突破集成电路的发展困境，进一步提升芯片的运算能力。有别于 0 和 1 组成的二进制电子计算体系，光子具有更多可控的调制和复用维度，例如相位、波长、偏振和模式等，在模拟计算和多比特计算上具有独特的优势，同时非常适用于大量的并行计算，是后摩尔时代集成电路发展的重要方向之一。

[0008] 现有的光子计算芯片技术路径为：利用马赫-曾德尔干涉仪（MZI）或微环结构

(MMR) 实现光子计算, 计算方式例如中国专利 CN115905792、CN113392965 所揭示, 以此基础形成的计算阵列如中国专利 CN10407644、CN116107037 所揭示, 但这些技术一般会存在以下不足:

[0009] 1、计算阵列规模限制: 基于 MZI 的光子计算芯片基础计算单元面积较大, 在硅光平台流片时, 常规晶圆面积下的掩模板难以将计算阵列规模做到应用级别。

[0010] 2、计算速度慢: 主要为利用基于硅基光电子技术的热光调谐原理, 同时会存在温度漂移的现象 (MMR 结构尤为显著), 影响光波导的折射率。

[0011] 3、设计&封装难度高: 基于 MZI 的光子计算芯片每个基础计算单元会有 10 个以上的电极数量, 布线数量极大, 设计难度和封装复杂程度高。

发明内容

[0012] 本发明提供了一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法及光子计算阵列、光电混合计算方法及其阵列, 能够部分地解决或缓解上述问题, 以满足高速、低能耗和高集成度的光子计算应用需求。

[0013] 为解决上述技术问题, 本发明采用了以下技术方案:

[0014] 本发明的第一方面, 在于提供了一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法, 其中, 所述光子计算单元包括第一光波导和基于光吸收效应的电光调制器, 所述电光调制器利用电信号作为外部激励, 在其掺杂区域中通过注入电流或施加电压改变其自由载流子浓度, 以改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α , 当第一光波导传播的光信号经过含自由载流子的光波导时会被自由载流子吸收, 所述方法包括以下步骤:

[0015] S101、将乘数值编码到写入信号中; S102、使用写入信号将乘数值映射到电光调制器的状态, 所述状态表现为不同自由载流子浓度下光波导对光的吸收系数 α ; S103、将被乘数值编码到输入信号; S104、输入信号通过第一光波导经过电光调制器的掺杂区域时, 产生输出信号强度, 其中, 乘数值和被乘数值的乘积被编码在输出信号强度中。

[0016] 在一些实施例中, 所述光子计算单元的尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ 。

[0017] 在一些实施例中, 不同自由载流子浓度下光波导对光的吸收系数 α , 在写入信号的作用下, 至少存在两个不同的光吸收系数。

[0018] 在一些实施例中, 所述电信号的电压幅值小于 10V, 持续时间小于 $100\ \mu\text{s}$ 。

[0019] 在一些实施例中, 所述基于光吸收效应的电光调制器包括基于半导体掺杂技术的掺杂区域和一对与掺杂区域形成欧姆接触或肖特基接触的接触电极。

[0020] 在一些实施例中, 所述第一光波导和电光调制器的相对位置, 可以在同一平面, 也可以不在同一平面。

[0021] 在一些实施例中, 电光调制器掺杂区域中的自由载流子在电场作用下的移动方向, 可以沿第一光波导的方向, 也可以垂直于第一光波导的方向, 掺杂区域可以在第一光波导的同一侧或两侧。

[0022] 在一些实施例中, 所述光子计算单元还包括用于实现加法计算的光学器件和第二光波导, 所述用于实现加法计算的光学器件称为光学加法器件, 步骤 S104 后还包括以下步骤:

[0023] S201、将加数值编码到第二光波导的输入信号; S202、光学加法器件对第一光波导的输出信号和第二光波导的输入信号进行耦合, 产生输出信号强度, 其中, 乘积和加数值的和被编码在光学加法器件的输出信号强度中。

[0024] 本发明的第二方面, 在于提供了一种用于片上大规模矩阵乘法运算的光子计算阵列, 包括:

[0025] 基于载流子光吸收效应的光子计算单元; 所述光子计算单元包括第一光波导和位于所述第一光波导上的基于光吸收效应的电光调制器; 所述电光调制器利用电信号作为外部激励, 在其掺杂区域通过注入电流或施加电压以改变其自由载流子 (电荷或空穴) 浓度, 来

改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，使得经过所述第一光波导的光信号被自由载流子吸收来实现乘法运算；

[0026] 交叉开关矩阵架构（Crossbar）；所述交叉开关矩阵架构由一组相互平行的输入行波导和一组相互平行的输出列波导交叉形成；

[0027] 所述光子计算阵列中每一个输入行波导与输出列波导的交叉点处均存在一个用于乘法运算的所述光子计算单元，每个所述光子计算单元的第一光波导通过波导耦合器件与邻近的波导耦合，所述波导耦合器件渐渐地耦合来自相邻的输入行波导的光功率的一部分，其中所耦合的光功率取决于所述波导耦合器件的被放置为相邻的输入行波导并且平行于相邻的输入行波导延伸的部分的长度。

[0028] 在一些实施例中，每个所述输入行波导和与其交叉的输出列波导的交叉点上都设置有交叉光波导。

[0029] 在一些实施例中，所述输入行波导与输出列波导相垂直。

[0030] 在一些实施例中，所述不同行的输入行波导的输入光信号的光的波长不同。

[0031] 在一些实施例中，所述输入光信号在波导耦合器件的作用下使其光功率平均分配至同一行上的每一个光子计算单元上。

[0032] 在一些实施例中，所述光子计算阵列的输入行波导的行数和输出列波导的列数至少大于等于 2。

[0033] 在一些实施例中，所述光子计算单元的尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ 。

[0034] 在一些实施例中，作为外部激励的所述电信号的电压幅值小于 10V，持续时间小于 $100\ \mu\text{s}$ 。

[0035] 在一些实施例中，所述光波导和电光调制器的相对位置可以在同一平面，也可以不在同一平面。

[0036] 在一些实施例中，所述光子计算阵列的输入行波导的输入端连接多路复用器（MUX），输出列波导的输出端连接解多路复用器（DEMUX）。

[0037] 本发明的第三方面，在于提供了一种用于片上大规模矩阵乘法运算的光电混合计算阵列，其包括一组光子计算单元，所述光子计算单元包括第一光波导以及光耦合到所述第一光波导的调制元件，所述调制元件根据所述自身状态来修改第一光波导的透射、反射、折射或吸收特性，其中，所述调制元件的自身状态能通过写入信号调整；所述状态表现为光波导对光的吸收系数 α 或折射率 n ；光输入信号通过所述光子计算单元后产生所述光输出信号，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码所述在光输出信号中；

[0038] 一组光电转换器件，与所述光子计算单元的第一光波导的输出侧一一匹配连接，将所述光输出信号转换成电流信号，所述电流信号的大小与所述光输出信号的功率成正比；

[0039] 交叉开关矩阵架构；所述交叉开关矩阵架构由一组相互平行的输入光波导和一组相互平行的电总线交叉形成；所述光输入信号通过所述输入光波导传输；

[0040] 所述交叉开关矩阵架构中每个输入光波导和电总线的交叉点处均存在一个所述光子计算单元，每个所述光子计算单元的第一光波导的输入侧通过波导耦合器件与邻近的输入光波导耦合，所述波导耦合器件渐渐地耦合来自相邻的输入光波导的光功率的一部分，其中所耦合的光功率取决于所述波导耦合器件的被放置为相邻的输入光波导并且平行于相邻的输入光波导延伸的部分的长度；

[0041] 每一条所述电总线上都接入有若干个并联的光电转换器件，所述电总线将通过该若干个并联的光电转换器件后转化的相应个数的电流信号进行求和，产生电输出信号，所述电流信号进行加法运算后的和被编码在所述电输出信号中。

[0042] 在一些实施例中，所述输入光波导和电总线相互垂直。

[0043] 在一些实施例中，所述不同行的输入光波导的光输入信号的光的波长不同或相

同。

[0044] 在一些实施例中，所述光输入信号在波导耦合器件的作用下使其光功率平均分配至同一行上的每一个所述光子计算单元上。

[0045] 在一些实施例中，所述输入光波导和电总线的列数均大于等于 2。

[0046] 在一些实施例中，所述电总线为光子计算芯片上的金属互联层。

[0047] 本发明的第四方面，在于提供了一种用于片上大规模矩阵乘法运算的光电混合计算方法，包括如下步骤：S1、提供光电混合计算单元，所述光电混合计算单元包括相互连接的光子计算单元和光电转换器件，所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号；所述光电转换器件将所述光输出信号转换成电流信号，所述电流信号的大小与所述光输出信号的功率成正比；S2、提供电总线，将通过若干个并联的光电转换器件后转化的相应个数的电流信号进行求和，产生电输出信号，所述电流信号进行加法运算后的和被编码在所述电输出信号中。

[0048] 在一些实施例中，所述步骤 S1 中“所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号”具体包括：S11、提供一写入信号，将乘数值编码到该写入信号中；S12、使用所述写入信号将乘数值映射到所述光子计算单元的状态，所述光子计算单元包括第一光波导以及光耦合到所述第一光波导的调制元件，所述调制元件根据所述自身状态来修改第一光波导的透射、反射、折射或吸收特性，其中，所述调制元件的自身状态能通过写入信号调整；所述状态表现为光波导对光的吸收系数 α 或折射率 n ；S13、将被乘数值编码到所述光子计算单元的光输入信号；所述光输入信号通过所述光子计算单元后产生所述光输出信号，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码所述在光输出信号中。

[0049] 在一些实施例中，所述调制元件为基于光吸收效应的电光调制器，所述电光调制器利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域通过注入电流或施加电压以改变其自由载流子浓度，来改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，进而使得经过所述第一光波导的光信号实现乘法运算。

[0050] 在一些实施例中，所述调制元件为沉积在光波导上的相变材料；所述相变材料可选择通过光信号作为外部激励来改变自身状态，所述自身状态表现为修改含有所述相变材料的光波导对光的吸收系数 α 。

[0051] 在一些实施例中，所述步骤 S1 中“所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号”采用马赫-曾德尔干涉仪（MZI）或微环结构（MMR）实现。

[0052] 在一些实施例中，所述电总线为光子计算芯片上的金属互联层。

[0053] 有益效果：本发明提供了一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，将基于光吸收效应的电光调制器配置为利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域中通过注入电流或施加电压改变其自由载流子浓度，从而改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，当光波导传播的光信号经过含自由载流子的光波导时会被自由载流子吸收，从而基于光吸收效应进行光子计算，每个光子计算单元的尺寸可以缩小到 $20\mu\text{m}\sim 30\mu\text{m}$ ，集成度更高，且调制速度快，可以小于 10ns，基于光吸收效应的电光调制器可以连续工作超过 10 万个小时，寿命更长。

[0054] 本发明提供的用于片上大规模矩阵乘法运算的新型光子计算阵列，为一种新型的光子计算芯片技术路径，其基础计算单元面积较小，在常规晶圆面积下的掩模板能够将计算阵列规模做到应用级别；调制速度快，能通过电脉冲将调制速度提高至纳秒级别，进而提高光子计算芯片的计算性能，同时不会造成温度漂移的现象；每个基础计算单元只会有 2 个电极，布线数量小，设计难度和封装复杂度低。

[0055] 本发明提供的光电混合计算阵列中的（1）基础计算单元面积较小，在常规晶圆面积下的掩模板能够将计算阵列规模做到应用级别；调制速度快，能通过电脉冲将调制速度

提高至纳秒级别，进而提高光子计算芯片的计算性能，同时不会造成温度漂移的现象；每个基础计算单元只会有 2 个电极，布线数量小，设计难度和封装复杂程度低；(2) 采用光电转换器件和电总线对不同行上的光子计算单元的带有积的光输出信号进行求和，一是对光源的输入功率要求更低，二是对不同行的输入光的波长要求也降低，因此，本发明的光电混合计算阵列在一定程度上降低了对光源的要求，能够更快地实现光源和光子计算芯片的集成化应用。

附图说明

[0056] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍。在所有附图中，类似的元件或部分一般由类似的附图标记标识。附图中，各元件或部分并不一定按照实际的比例绘制。显而易见地，下面描述中的附图是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其它的附图。

[0057] 图 1 是本发明一示例性实施例提供的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法整体流程示意图；

[0058] 图 2 是本发明一示例性实施例提供的基于光吸收效应的光子计算单元结构示意图；

[0059] 图 3 是本发明一示例性实施例提供的基于光吸收效应的光子计算单元工作原理示意图；

[0060] 图 4 是本发明一示例性实施例提供的用于乘加运算的光子计算单元结构示意图；

[0061] 图 5 是本发明一示例性实施例提供的用于乘加运算的光子计算单元工作原理示意图；

[0062] 图 6 是本发明一示例性实施例的一种基于多模干涉器的超大规模光电混合计算阵列的示意图；

[0063] 图 7 是本发明一示例性实施例的 3x8 光电混合计算阵列的示意图；

[0064] 图 8 是本发明一示例性实施例的光电混合计算单元个数不是 2^n 个时的一种示范例；

[0065] 图 9 是本发明一示例性实施例的光电混合计算单元个数不是 2^n 个时的另一种示范例；

[0066] 图 10 是本发明一示例性实施例光电混合计算方法的流程示意图；

[0067] 图 11 是本发明一示例性实施例的光电混合计算阵列的示意图；

[0068] 图 12 是本发明一示例性实施例的 3*3 光电混合计算阵列的示意图；

[0069] 图 13 是本发明又一示例性实施例的光电混合计算阵列的示意图；

[0070] 图 14 是本发明再一示例性实施例的光电混合计算阵列的示意图。

[0071] 附图标记：1 光子计算单元；11 第一光波导，12 电光调制器，103a 第一接触电极，103b 第二接触电极，104a 第一电互联器件，104b 第二电互联器件，105 电信号发生器，106 输入信号，107 输出信号，108 写入信号，109 光学加法器件，110 第二光波导，111 光吸收波导，112 第二光波导的输入信号，113 光学加法器件的输出信号强度；行波导耦合器件 21、列波导耦合器件 22；输入行波导 31、输出列波导 32、电总线 33；交叉光波导 4；光电转换器件 5；

[0072] 101-1、101-2、101-m、101a、101b、101c 为阵列中的输入行波导；102-1、102-2、102-n、101-1'、101-1'、102-2'、102-3'、102-2'、102-n'、102a、102b、102c、为阵列中的输出列波导； U_{11} 、 U_{12} 、 U_{13} 、 U_{21} 、 U_{22} 、 U_{23} 、 U_{31} 、 U_{32} 、 U_{33} 、 U_{m1} 、 U_{m2} 、 U_{mn} 、 U_{2n} 、 U_{1n} 为阵列中的光子计算单元； P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_m 、 λ_1 - λ_n 为输入编码； A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_m 、 λ_1' - λ_n' 为输出信号； r_{11} 、 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{21} 、 r_{22} 、 r_{23} 、 r_{31} 、 r_{32} 、 r_{33} 、 r_{m1} 、 r_{m2} 、 r_{mn} 、 r_{2n} 、 r_{1n} 为行波导耦合器件的分光比；

[0073] c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} 、 c_{21} 、 c_{22} 、 c_{23} 、 c_{31} 、 c_{32} 、 c_{33} 、 c_{m1} 、 c_{m2} 、 c_{mn} 、 c_{1n} 、 c_{2n} 为列波导耦合器件的分光比； d_{11} 、 d_{12} 、 d_{13} 、 d_{21} 、 d_{22} 、 d_{23} 、 d_{31} 、 d_{32} 、 d_{33} 、 d_{m1} 、 d_{m2} 、 d_{mn} 、 d_{1n} 、 d_{2n} 、 β 为光电转换器件将光信号转换为电流的响应度。

具体实施方式

[0074] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。显然，所描述的实施例是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0075] 本文中，使用用于表示元件的诸如“模块”、“部件”或“单元”的后缀仅为了有利于本发明的说明，其本身没有特定的意义。因此，“模块”、“部件”或“单元”可以混合地使用。本文中，术语“上”、“下”、“内”、“外”“前”、“后”、“一端”、“另一端”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性。本文中，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“设置有”、“连接”等，应做广义理解，例如“连接”，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或一体地连接；可以是机械连接，可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。本文中“和/或”包括任何和所有一个或多个列出的相关项的组合。本文中“多个”意指两个或两个以上，即其包含两个、三个、四个、五个等。

[0076] 本文中“光”是指波长在紫外(UV)到红外(IR)范围内(例如，在 10nm 和 100 μ m 之间)的电磁辐射或电磁波，其可以在自由空间中传播，并由波导引导。

[0077] 本文中“光波导”是指用于在一个或多个维度上将光限制在其表面内或邻近其表面的区域，从而在平行于其轴的传播方向上引导光的任何结构。波导由具有不同折射率的一系列层/区域形成，通常包括内层/区域或芯层/区域。相比周围(外)层/区域或包覆层/区域，内层/区或芯层/区由折射率更高的材料制成。在这种情况下，波导在厚度/增长方向和垂直于厚度/增长方向的横向/宽度方向上将光限制在两个维度上，例如，限制在通道内。芯层/区域和/或所述包覆层/区域可称为主动限制和引导光的引导层。

[0078] 本文中“调制器”是指对光的特性有影响的任何实体。其中，光的特性包括透射，折射，吸收等。在一些实施例中，该光调制器包括由相变材料制成的相变材料层，或者可以由相变材料制成。

[0079] **实施例 1：**参照图 1，为本发明一示例性实施例提供的一种通过光子计算单元在光域中进行乘法运算的方法，其中，光子计算单元包括第一光波导 11 和基于光吸收效应的电光调制器 12，参见图 2。

[0080] 在一些实施例中，电光调制器 12 利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域中通过注入电流或施加电压改变其自由载流子浓度，以改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 。当第一光波导 101 传播的光信号经过含自由载流子的光波导时会被自由载流子吸收。

[0081] 在一些实施例中，该方法的实现具体包括以下步骤：

[0082] S101、将乘数值编码到写入信号 108 中。S102、使用写入信号 108 将乘数值映射到电光调制器 12 的状态，所述状态表现为不同自由载流子浓度下光波导对光的吸收系数 α 。S103、将被乘数值编码到输入信号 106。S104、输入信号 106 通过第一光波导 11 经过电光调制器 102 的掺杂区域时，产生输出信号 107 强度，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码在输出信号 107 强度中。

[0083] 在一些实施例中，用于改变电光调制器 12 中自由载流子浓度的写入信号 108 由

电信号发生器 105 提供, 电信号发生器 105 的金属层中的第一电互联器件 104a 和第二电互联器件 104b 通过第一接触电极 103a、第二接触电极 103b 将所生成的电信号传输到电光调制器 102 的掺杂区域。电信号导致自由载流子在电场作用下产生定向移动, 而电信号的参数变化可以改变掺杂区域中的自由载流子浓度, 从而改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数。所述基于光吸收效应的电光调制器 12 包括基于离子注入或高温扩散等半导体掺杂技术的掺杂区域和一对与掺杂区域形成欧姆接触或肖特基接触的接触电极。

[0084] 参照图 3, 电信号发生器 105 使用外部的电信号——即写入信号 108 将数字 b 映射到含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α , 电光调制器 12 注入电流或施加电压使掺杂区域中的自由载流子浓度 (电荷或空穴) 产生变化, 改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 。外部的电信号的能量 P_{write} 与光的吸收系数具有初等函数或有理函数形式的映射, 输入信号 106 与含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 成反比的衰减, 从而产生对应于外部的电信号——写入信号 108 和输入信号 106 的乘法输出信号 107, 第一光波导 11 的输出信号 $P_{\text{out}} = P_{\text{write}} \times P_{\text{in}}$ 是将乘数值 b 映射到 α 并将被乘数值 a 映射到 P_{in} 的结果。

[0085] 示例性的, 光子计算单元的尺寸小于 $100 \mu\text{m}$, 优选的, 光子计算单元的尺寸为 $20 \mu\text{m} \sim 30 \mu\text{m}$ 。目前基于 MZI 结构的光子计算单元尺寸在 $200 \mu\text{m} \sim 300 \mu\text{m}$, 而本实施例提供的光子计算单元尺寸显然要小于前者, 实现了光子计算单元的小型化, 集成度更高。随着单个光子计算单元尺寸的缩小, 使得每个器件在芯片上的实际面积减小, 在硅光平台流片时, 常规晶圆面积 (例如 8 英寸晶圆) 下的光学掩模版可以支持数量更多的光子计算单元, 形成更大规模矩阵的光子计算阵列, 提高光子计算芯片的集成度。

[0086] 可以理解的, 不同自由载流子浓度下光波导的光吸收系数 α , 在写入信号的作用下, 至少存在两个不同的光吸收系数。

[0087] 在一些实施例中, 电信号的电压幅值小于 10V, 持续时间小于 $100 \mu\text{s}$ 。在一些较优实施方式中, 电信号的电压幅值小于 5V, 持续时间小于 100ns。目前基于热光调制的 MZI 光子计算单元调制速度在微秒量级, 而本实施例提供的电光调制器, 利用掺杂半导体器件, 调制速度可达到 100ns 以下, 甚至达到 10ns 以下, 大大提升了光子计算单元的计算速度。电信号的幅值优选小于 5V, 从而可以很好地与现有电芯片电平兼容, 不需要额外进行电路设计, 可以直接用电芯片发射脉冲对光子计算单元中的光信号进行调制。

[0088] 对于第一光波导 11, 其材料可以是硅、氮化硅、磷化铟、铌酸锂、氮化镓、砷化镓、氮化铝、氧化镁或金刚石 (多晶或单晶)。

[0089] 对于所述基于光吸收效应的电光调制器, 其掺杂区域可以是 PIN 结、PN 结、P 型掺杂器件、N 型掺杂器件中的一种。

[0090] 可选的, 电光调制器 12 中的掺杂区域, 可以沿第一光波导 101 的方向, 也可以垂直于第一光波导 11 的方向, 掺杂区域可以分布在波导的同一侧或在波导的两侧均有分布。

[0091] **实施例 2:** 参照图 4 和图 5, 在本发明的另一个实施例中, 提供了一种通过光子计算单元在光域中进行乘加计算的方法, 其中, 光子计算单元包括第一光波导 11、基于光吸收效应的电光调制器 12、用于实现加法计算的光学器件和第二光波导 110。

[0092] 电光调制器 12 利用电信号作为外部激励, 在其掺杂区域中通过注入电流或施加电压改变其自由载流子浓度, 以改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 。当第一光波导 11 传播的光信号经过含自由载流子的光波导时会被自由载流子吸收。所述用于实现加法计算的光学器件称为光学加法器件 109。通过光子计算单元在光域中进行乘加计算的方法具体包括以下步骤: S101、将乘数值编码到写入信号 108 中。S102、使用写入信号 108 将乘数值映射到电光调制器 12 的状态, 所述状态表现为不同自由载流子浓度下光波导对光的吸收系数 α 。S103、将被乘数值编码到输入信号 106。S104、输入信号 106 通过第一光波导 11 经过电光调制器 102 的光吸收波导 111 时, 产生输出信号强度, 其中, 乘数值和被乘数值的乘积被

编码在输出信号强度中。S201、将加数值编码到第二光波导 110 的输入信号 112。S202、光学加法器件 109 对第一光波导 11 的输出信号和第二光波导 110 的输入信号进行耦合，产生输出信号强度，其中，乘积和加数值的和被编码在光学加法器件 109 的输出信号强度 113 中。

[0093] 所述光学加法器件 109 可以是定向耦合器、多模干涉器、光合束器中的一种，本领域技术人员也可以根据实际需要采用其他能够实现相同功能的光学器件，本实施例对此不做具体限定。

[0094] **实施例 3：**如图 6 所示，本发明揭示了一种用于片上大规模矩阵乘法运算的光子计算阵列，包括基于载流子光吸收效应的光子计算单元 1、波导耦合器件和交叉开关矩阵架构（Crossbar）。具体来讲，所述交叉开关矩阵架构由一组相互平行的输入行波导 31 和一组相互平行的输出列波导 32 交叉形成；优选的，所述输入行波导 31 与输出列波导 32 相垂直。

[0095] 本发明中的所述光子计算阵列的输入行波导 31 的行数和输出列波导 32 的列数至少大于等于 2。优选的，每个所述输入行波导 31 和与其交叉的输出列波导 32 的交叉点上都设置有交叉光波导 4，实现波导交叉时光信号的低损传输。

[0096] 所述光子计算阵列中每一个输入行波导 31 与输出列波导 32 的交叉点处均存在一个用于乘法运算的所述光子计算单元 1。所述光子计算单元 1 包括第一光波导 11 和位于所述第一光波导 11 上的基于光吸收效应的电光调制器 12；所述电光调制器 12 利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域通过注入电流或施加电压以改变其自由载流子（电荷或空穴）浓度，来改变含自由载流子的光波导 11 对光信号的吸收系数 α ，使得经过所述第一光波导 11 的光信号被自由载流子吸收，从而实现乘法运算。其中，注入电流或施加电压主要是以电脉冲的形式，电脉冲的持续时间在纳秒级别，同时电脉冲的持续时间决定了光子计算阵列的调制速度，进而决定了光子计算阵列的计算性能；同时不会造成温度漂移的现象。

[0097] 本发明光子计算阵列完成乘法运算如图 1-图 3 所示，这里不再赘述。其中，用于改变电光调制器 12 中自由载流子浓度的写入信号 108 由电信号发生器 105 提供。电信号发生器 105 的金属层中的两个电互联器件 104a、104b 分别通过第一接触电极 103a、第二接触电极 103b 将所生成的电信号传输到电光调制器 12 的掺杂区域。电信号导致自由载流子在电场作用下产生定向移动，而电信号的参数变化可以改变掺杂区域中的自由载流子浓度，从而改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数。所述基于光吸收效应的电光调制器包括基于离子注入或高温扩散等半导体掺杂技术的掺杂区域和一对与掺杂区域形成欧姆接触或肖特基接触的接触电极。

[0098] 电信号发生器 105 使用外部的电信号——即写入信号 108 将乘数值 b 映射到含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，电光调制器 12 注入电流或施加电压使掺杂区域中的自由载流子浓度（电荷或空穴）产生变化，改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 。外部的电信号的能量 P_{write} 与光的吸收系数 α 具有初等函数或有理函数形式的映射，输入光信号 106 随含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 呈反比的衰减，从而产生对应于外部的电信号——写入信号 108 和输入光信号 106——的乘法输出信号 107，所述第一光波导 11 的输出信号 $P_{\text{out}} = \alpha \times P_{\text{in}}$ 是将乘数值 b 映射到 α 并将被乘数值 a 映射到 P_{in} 的结果。

[0099] 本发明的光子计算单元 1 的尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ ，优选的，光子计算单元的尺寸为 $20\ \mu\text{m} \sim 30\ \mu\text{m}$ 。目前基于 MZI 结构的光子计算单元尺寸在 $200\ \mu\text{m} \sim 300\ \mu\text{m}$ ，而本实施例提供的光子计算单元尺寸显然要小于前者，实现了光子计算单元的小型化，高集成度。随着单个光子计算单元尺寸的缩小，使得每个器件在芯片上的实际面积减小，在硅光平台流片时，常规晶圆面积（例如 8 英寸晶圆）下的光学掩模板可以支持数量更多的光子计算单元，形成更大规模矩阵的光子计算阵列，从而提高光子计算芯片的集成度。

[0100] 现有的基于 MZI 的光子计算阵列尺寸较大，在硅光平台流片时，常规晶圆面积（如 8 英寸晶圆）下的掩模板无法支持 128×128 矩阵规模的光子计算阵列，而 128×128 矩阵规模

的光子计算阵列是商业化应用的门槛，本发明所提出的一种用于片上大规模矩阵乘法运算的新型光子计算阵列在常规晶圆面积下的掩模板能做到 400*400 矩阵规模，远远大于商业化应用的门槛。

[0101] 本实施例中，电信号的电压幅值小于 10V，持续时间小于 100 μ s。在一些较优实施方式中，电信号的电压幅值小于 5V，持续时间小于 100ns。目前基于热光调制的 MZI 光子计算单元调制速度在微秒量级，而本实施例提供的电光调制器，利用掺杂半导体器件，调制速度可达到 100ns 以下，甚至达到 10ns 以下，大大提升了光子计算单元的计算速度。电信号的幅值优选小于 5V，从而可以很好地与现有电芯片电平兼容，不需要额外进行电路设计，可以直接用电芯片发射脉冲对光子计算单元中的光信号进行调制。

[0102] 在调制器方面，基于 MZI 的光子计算阵列，每一个计算单元包含 10 个电极以上，而本发明所提出的一种用于片上大规模矩阵乘法运算的新型光子计算阵列每一个光子计算单元只有 2 个电极，从设计和封装的角度上分析，其难度远远小于基于 MZI 的光子计算阵列。

[0103] 本发明优选实施例中，每个所述光子计算单元 1 的第一光波导 11 均通过所述波导耦合器件与邻近的波导耦合，例如：第一光波导 11 的其中一端通过行波导耦合器件 21 与毗邻的输入行波导 31 耦合，另一端通过列波导耦合器件 22 与毗邻的输出列波导 32 耦合。所述波导耦合器件渐渐地耦合来自相邻的输入行波导 31 的光功率的一部分，其中所耦合的光功率取决于所述波导耦合器件的被放置为相邻的输入行波导 31 并且平行于相邻的输入行波导 31 延伸的部分的长度。

[0104] 本发明的特点采用波导耦合器件和交叉开关矩阵架构将单个乘法运算的光子计算单元互联形成交叉开关矩阵（Crossbar）架构实现大规模矩阵乘法运算。即：每一个光子计算单元经过如上的乘法运算后，带有积的输出信号通过列波导耦合器件 22 在输出列波导 32 上进行求和，将加数值编码到输出列波导的输入信号，列波导耦合器件确保使每一个波长下的光功率的公共因子相同，对输入行波导的输出信号和输出列波导的输入信号进行耦合，产生输出信号，其中，乘积和加数值的和被编码在输出列波导的输出信号的光功率中。当然，输入行波导和输出列波导的顺序不是固定的，可以通过列波导输入光信号进行乘法运算，并通过行波导进行累加运算后输出。

[0105] 本发明通过交叉开关矩阵架构实现大规模矩阵行和列之间光信号的低损传输，最终实现大规模矩阵乘法运算。在一优选实施例中，不同行的输入行波导 31 的输入光信号的光的波长不同，避免光在加法运算时产生干涉现象，影响光子计算的精度。

[0106] 具体如图 6 所示，本发明提供了一种在光域中执行矩阵乘法运算的方法，该方法实现计算 $m \times n$ 阶矩阵 $P \times Q = A$ ：

$$[0107] \quad \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_m \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2n} \\ \dots & \dots & Q_{(m-1)(n-1)} & \dots \\ Q_{1m} & Q_{2m} & \dots & Q_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{pmatrix}$$

[0108] 具体包括以下步骤：

[0109] （1）将权重矩阵 Q 编码到写入信号中，例如第一行第一列的光子计算单元 U_{11} 中输入编码 Q_{11} ，第一行第二列的光子计算单元 U_{12} 中输入编码 Q_{12} ，第二行第一列的光子计算单元 U_{21} 中输入编码 Q_{21} ，以此类推；

[0110] （2）使用写入信号将乘数值映射到每一个光子计算单元中的电光调制器的状态，所述状态表现为光波导对光的吸收系数 α ；

[0111] (3) 将输入数据矩阵 P 编码到输入光信号, 该输入光信号在行波导耦合器件 21 的作用下使其光功率平均分配至同一行上的每一个单元上; 例如第一行的输入行波导中输入编码 P_1 , 第二行的输入行波导中输入编码 P_2 , 以此类推;

[0112] (4) 输入光信号通过光波导经过光子计算单元的电光调制器的光吸收区域时, 产生输出信号, 其中, 乘数值和被乘数值的乘积被编码在输出信号中, 输出信号的光功率通过列波导耦合器件 22 在列波导上进行求和, 列波导耦合器件能够使每一个波长下的光功率的公共因子相同;

[0113] 例如: 第一列的输出光功率为:

$$r_{11}c_{11}(1-c_{21})\dots(1-c_{m1})P_1Q_{11}+r_{21}c_{21}(1-c_{31})\dots(1-c_{m1})P_2Q_{21}+\dots+r_{m1}c_{m1}P_mQ_{m1}=A_1$$

$$\frac{1}{m*n}(P_1Q_{11}+P_2Q_{21}+\dots+P_mQ_{m1})=A_1$$

[0114] 上式中的公共因子为 $1/m*n$; r_{11} 、 r_{21} 、 r_{m1} 为行波导耦合器件的分光比; c_{11} 、 c_{21} 、 c_{31} 、 c_{m1} 为列波导耦合器件的分光比。以此类推。

[0115] 如图 7 所示为本发明光子计算阵列的扩展应用。在所述光子计算阵列的输入行波导 31 的输入端连接多路复用器 MUX, 在输出列波导 32 的输出端连接解多路复用器 DEMUX。输入矩阵的每个分量都使用多个不同波长的光信号, 多路复用器的通道数决定了光子计算阵列计算能力的提高倍数。

[0116] 图 8 揭示了一种实施例 3*3 光子计算阵列的示意图, 实现计算三阶矩阵 $P \times Q = A$:

$$[0117] \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix},$$

[0118] 其中: 101a、101b、101c: 输入行波导; 102a、102b、102c: 输出列波导; P_1 、 P_2 、 P_3 : 输入(读取)光信号; A_1 、 A_2 、 A_3 : 输出信号; Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{13} 、 Q_{21} 、 Q_{22} 、 Q_{23} 、 Q_{31} 、 Q_{32} 、 Q_{33} : 分别是用于乘法运算的光子计算单元 U_{11} 、 U_{12} 、 U_{13} 、 U_{21} 、 U_{22} 、 U_{23} 、 U_{31} 、 U_{32} 、 U_{33} 中输入编码; r_{11} 、 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{21} 、 r_{22} 、 r_{23} 、 r_{31} 、 r_{32} 、 r_{33} : 行波导耦合器件的分光比; c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} 、 c_{21} 、 c_{22} 、 c_{23} 、 c_{31} 、 c_{32} 、 c_{33} : 列波导耦合器件的分光比。

[0119] 根据本发明方法可以实现计算第一列的光功率输出, 为:

$$[0120] r_{11}c_{11}(1-c_{21})(1-c_{31})Q_{11}P_1+r_{21}c_{21}(1-c_{31})Q_{21}P_2+r_{31}c_{31}Q_{31}P_3=\frac{1}{9}(Q_{11}P_1+Q_{21}P_2+Q_{31}P_3)=A_1, \text{ 上式中的}$$

公共因子为 $1/9$ 。

[0121] 同样的, 图 9 所示为图 8 中实施例的光子计算阵列的扩展应用。在光子计算阵列的输入端加入多路复用器(MUX), 在输出端加入解多路复用器(DEMUX), 输入矩阵的每个分量都使用 3 个不同的波长, 将光子计算阵列的计算能力提高 3 倍。

[0122] **实施例 4:** 本发明提供的一种用于片上大规模矩阵乘法运算的光电混合计算阵列, 具体结构如图 11 所示的优选实施例, 包括光电混合计算单元、行波导耦合器件 21、输入光波导 31 和电总线 33。所述光电混合计算单元包括光子计算单元 1 和光电转换器件 5。

[0123] 本发明采用所述光子计算单元 1 进行乘法运算, 其包括第一光波导 11 以及光耦

合到所述光波导的调制元件，所述调制元件根据所述自身状态来修改光波导的透射、反射、折射或吸收特性，其中，所述调制元件的自身状态能通过写入信号调整；所述状态表现为光波导对光的吸收系数 α 或折射率 n 。光输入信号通过所述光子计算单元后产生所述光输出信号，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码所述在光输出信号中。

[0124] 本发明中，所述调制元件包括三种形式。

[0125] 如图 11 所示的优选实施例中，所述调制元件为基于光吸收效应的电光调制器 12，所述电光调制器 12 利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域通过注入电流或施加电压以改变其自由载流子浓度，来改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，使得经过所述光波导的光信号被自由载流子吸收来实现乘法运算。

[0126] 具体乘法运算过程如图 1-图 3 所示，包括步骤 S101-S103，不再赘述。其中，用于调制元件 12 中自由载流子浓度的写入信号 108 由电信号发生器 105 提供。电信号发生器 105 的金属层中的两个电互联器件分别通过第一接触电极 103a、第二接触电极 103b 将所生成的电信号传输到调制元件 12 的掺杂区域。电信号导致自由载流子在电场作用下产生定向移动，而电信号的参数变化可以改变掺杂区域中的自由载流子浓度，从而改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数。所述基于光吸收效应的电光调制器包括基于离子注入或高温扩散等半导体掺杂技术的掺杂区域和一对与掺杂区域形成欧姆接触或肖特基接触的接触电极。

[0127] 电信号发生器 105 使用外部信号——即写入信号 108 将乘数值 b 映射到含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，光电调制元件 12 注入电流或施加电压使掺杂区域中的自由载流子浓度（电荷或空穴）产生变化，改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 。外部的电信号的能量 P_{write} 与光的吸收系数 α 具有初等函数或有理函数形式的映射，光输入信号 106 随含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α 呈反比的衰减，从而产生对应于外部的电信号写入信号 108 和光输入信号 106 的乘法输出信号 107，所述第一光波导 11 的输出信号 $P_{\text{out}} = \alpha \times P_{\text{in}}$ 是将乘数值 b 映射到 α 并将被乘数值 a 映射到 P_{in} 的结果。

[0128] 基于相变材料的新兴光子器件近年来得到广泛研究。相变材料具有读写速度快（纳秒量级）、循环次数高（ $>10^{12}$ ）、功耗低等特点，可与现有的 CMOS 工艺兼容，技术实现难度和产业成本较低。相变材料在晶态和非晶态时光学和电学特性差异较大，可以通过热、光、电等多种方式诱导进行相变，且具有稳定的特性。相变材料对于光的调制不需要静态偏置电压的保持，在室温下可以保持某一个状态不改变。因此相变材料的理论静态控制能耗为零，大大降低了系统的能耗，也提高了系统的稳定性，这些特性使得相变材料有潜力成为光子计算的基础功能材料。

[0129] **实施例 5：**如图 13 所示混合光电计算阵列包括上述实施例 4 中的各个部件，不同的是，该调制元件采用沉积在第一光波导 11 上的相变材料 12'；所述相变材料 12' 采用光信号作为外部激励（即写入信号）来改变自身状态，所述自身状态表现为修改含有所述相变材料 12' 的光波导对光的吸收系数 α 。选择相变材料来作为调制元件，其优势在于相变材料具有非易失性，在经过调制断电之后可以保持在该状态，极其适配人工智能用于推理的应用场景。由于相变材料具有非易失性的特点，相较于现有的光子计算芯片的技术路径，没有维持功耗的产生，有极高的算力能耗比。

[0130] 具体来说，通过光波导传输作为写入信号的光信号，例如采用特定的高功率的光信号，并附以特定时间，即可改变该相变材料的自身状态，即表现为修改含有相变材料的光波导对光的吸收系数 α 。基于相变材料的光电混合计算阵列在一定程度上降低了对光源的要求，能够更快的实现光源和光子计算芯片的集成化应用。

[0131] **实施例 6：**如图 14 所示混合光电计算阵列包括上述实施例 4 中的各个部件，不同的是，所述调制元件为基于所述相变材料的调制器。当采用光信号进行调制时，没有掺杂区域。当采用电信号调制时，需包含掺杂区域。采用该实施例后可选择性地采用光信号或电信

号作为写入信号。采用电信号进行调制的乘法计算过程与优选实施例相类似，采用光信号进行调制的乘法运算过程第二实施例相类似，因此不再赘述。

[0132] 当然，本发明的乘法运算，也可采用现有技术的马赫-曾德尔干涉仪（MZI）或微环结构（MMR）实现。

[0133] 所述光电转换器件 5 与所述光子计算单元 1 的光波导的输出侧匹配连接，将所述光输出信号转换成电流信号，所述电流信号的大小与所述光输出信号的功率成正比。因此，光电转换器件 5 的数量和位置设置与光子计算单元 1 一一对应。

[0134] 本发明的光电混合计算阵列采用的是交叉开关矩阵架构（Crossbar）；由一组可被掺杂的输入光波导 31 和一组所述电总线 33 交叉形成。所述光输入信号通过所述输入光波导 31 传输。所述可被掺杂的输入光波导 31 呈行间平行排列，所述电总线 33 呈列间平行排列。优选的，可被掺杂的输入光波导与电总线之间相互垂直。本发明中，所述可被掺杂的输入光波导 31 和电总线 33 的列数均大于等于 2。

[0135] 所述交叉开关矩阵架构中每个输入光波导 31 和电总线 33 的交叉点处均存在一个所述光子计算单元 1，每个所述光子计算单元 1 的第一光波导 11 的输入侧通过行波导耦合器件 21 与邻近的输入光波导 31 耦合，所述行波导耦合器件 21 渐渐地耦合来自相邻的输入光波导 31 的光功率的一部分，其中所耦合的光功率取决于所述波导耦合器件 5 的被放置为相邻的输入光波导并且平行于相邻的输入光波导延伸的部分的长度。

[0136] 所述第一光波导 11 的另一侧则通过所述光电转换器件 5 与邻近的电总线 33 耦合。优选的，所述电总线 33 采用光子计算芯片上的金属互联层。

[0137] 每一条所述电总线 33 上都接入有若干个并联的光电转换器件 5，所述电总线 33 将通过该若干个并联的光电转换器件 5 后转化的相应个数的电流信号进行求和，产生电输出信号，所述电流信号进行加法运算后的和被编码在所述电输出信号中。

[0138] 本发明的特点采用交叉开关矩阵（Crossbar）架构实现大规模矩阵乘法加法运算。即：经过光子计算单元的乘法运算后，带有积的光输出信号通过光电转换器件转成电流信号后，随即在电总线上进行求和。

[0139] 在一优选实施例中，不同行的输入行波导 31 的光输入信号的光的波长不同，是为了避免光在加法运算时产生干涉现象，影响光子计算的精度。由于本发明采用基于电总线的光电混合计算架构，不同行的输入行波导 31 的光的波长可以相同，降低了对光源波长的要求。

[0140] 具体如图 10 和图 11 所示，本发明提供了一种在光域中执行矩阵乘法加法运算的方法，简单来讲，包括如下步骤：

[0141] S1、提供光电混合计算单元，所述光电混合计算单元包括相互连接的光子计算单元和光电转换器件，所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号；所述光电转换器件将所述光输出信号转换成电流信号，所述电流信号的大小与所述光输出信号的功率成正比；

[0142] S2、提供电总线，将通过若干个并联的光电转换器件后转化的相应个数的电流信号进行求和，产生电输出信号，所述电流信号进行加法运算后的和被编码在所述电输出信号中。

[0143] 该方法实现计算 $m \times n$ 阶矩阵 $P \times Q = A$ ：

$$[0144] \quad \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_m \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2n} \\ \dots & \dots & Q_{(m-1)(n-1)} & \dots \\ Q_{lm} & Q_{2m} & \dots & Q_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{pmatrix}。$$

[0145] 具体包括以下步骤：

[0146] (1) 将权重矩阵 Q 编码到写入信号中，例如第一行第一列的光子计算单元 U_{11} 中输入编码 Q_{11} ，第一行第二列的光子计算单元 U_{12} 中输入编码 Q_{12} ，第二行第一列的光子计算单元 U_{21} 中输入编码 Q_{21} ，以此类推；

[0147] (2) 使用写入信号将乘数值映射到每一个光子计算单元中的调制元件 12 或 12' 的状态，所述状态表现为第一光波导 11 对光的吸收系数 α ；

[0148] (3) 将输入数据矩阵 P 编码到光输入信号，该光输入信号在行波导耦合器件 21 的作用下使其光功率平均分配至同一行输入光波导 31 上的每一个单元上；例如第一行的输入光波导中输入编码 P_1 ，第二行的输入光波导中输入编码 P_2 ，以此类推；

[0149] (4) 所述光输入信号通过第一光波导 11 经过光子计算单元 1 的调制元件后，产生光输出信号，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码在该光输出信号中，光输出信号的光功率通过光电转换器件 5 将光信号转换成电流信号汇入至电总线 33 上进行求和，电流信号的大小与光输出信号的功率成正比，光输出信号转换成电流信号响应为 β ，在实际应用中， β 的数值取决于硅光芯片制造厂的工艺水平。

[0150] 例如：第一列的光输出信号的功率为：

$$[0151] \quad r_{11}d_{11}P_1Q_{11} + r_{21}d_{21}P_2Q_{21} + \dots + r_{m1}d_{m1}P_mQ_{m1} = A_1$$

$$\frac{\beta}{n}(P_1Q_{11} + P_2Q_{21} + \dots + P_mQ_{m1}) = A_1。$$

[0152] 上式中的公共因子为 β/n 。以此类推。

[0153] 图 12 揭示了一种实施例 3*3 光电混合计算阵列的示意图，实现计算三阶矩阵 $P \times Q = A$ ：

$$[0154] \quad \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}。$$

[0155] 其中：101-1、101-2、101-3：输入光波导；102-1'、102-2'、102-3'：电总线； P_1 、 P_2 、 P_3 ：输入（读取）信号； A_1 、 A_2 、 A_3 ：电输出信号； Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{13} 、 Q_{21} 、 Q_{22} 、 Q_{23} 、 Q_{31} 、 Q_{32} 、 Q_{33} ：用于乘法运算的光子计算单元 U_{11} 、 U_{12} 、 U_{13} 、 U_{21} 、 U_{22} 、 U_{23} 、 U_{31} 、 U_{32} 、 U_{33} 中输入编码； r_{11} 、 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{21} 、 r_{22} 、 r_{23} 、 r_{31} 、 r_{32} 、 r_{33} ：波导耦合器件的分光比； d_{11} 、 d_{12} 、 d_{13} 、 d_{21} 、 d_{22} 、 d_{23} 、 d_{31} 、 d_{32} 、 d_{33} ：光电转换器件将光信号转换为电流的响应度，均为 β 。

[0156] 根据本发明方法可以实现计算第一列的光功率输出，为：

$$[0157] \quad r_{11}d_{11}Q_{11}P_1 + r_{21}d_{21}Q_{21}P_2 + r_{31}d_{31}Q_{31}P_3 = \frac{\beta}{3}(Q_{11}P_1 + Q_{21}P_2 + Q_{31}P_3) = A_1，$$

式中的公共因子为 $\beta/3$ 。

[0158] 本发明采用基于电总线求和的光电混合计算阵列，相较于基于光总线求和的光子计算阵列，没有交叉波导和列波导耦合器件本身带来的损耗，同时由于没有光路中的交叉传输结构，对输入光的波长要求也较低，各个输入通道之间可以是同波长，也可以是不同波长。

[0159] 本发明注入电流或施加电压主要是以电脉冲的形式，电脉冲的持续时间在纳秒级别，同时电脉冲的持续时间决定了光电混合计算阵列的调制速度，进而决定了光电混合计算阵列的计算性能；同时不会造成温度漂移的现象。

[0160] 需要说明的是，在本文中，术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含，从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者装置不仅包括那些要素，而且还包括没有明确列出的其他要素，或者是还包括为这种过程、方法、物品或者装置所固有的要素。在没有更多限制的情况下，由语句“包括一个……”限定的要素，并不排除在包括该要素的过程、方法、物品或者装置中还存在另外的相同要素。

[0161] 上面结合附图对本发明的实施例进行了描述，但是本发明并不局限于上述的具体实施方式，上述的具体实施方式仅仅是示意性的，而不是限制性的，本领域的普通技术人员在本发明的启示下，在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下，还可做出很多形式，这些均属于本发明的保护之内。

权 利 要 求 书

1. 一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，所述光子计算单元包括第一光波导和基于光吸收效应的电光调制器，所述电光调制器利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域中通过注入电流或施加电压改变其自由载流子浓度，以改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，当第一光波导传播的光信号经过含自由载流子的光波导时会被自由载流子吸收，所述方法包括以下步骤：

S101、将乘数值编码到写入信号中；

S102、使用写入信号将乘数值映射到电光调制器的状态，所述状态表现为不同自由载流子浓度下光波导对光的吸收系数 α ；

S103、将被乘数值编码到输入信号；

S104、输入信号通过第一光波导经过电光调制器的掺杂区域时，产生输出信号强度，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码在输出信号强度中。

2. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，所述光子计算单元的尺寸小于 $100\mu\text{m}$ 。

3. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，不同自由载流子浓度下光波导对光的吸收系数 α ，在写入信号的作用下，至少存在两个不同的光吸收系数。

4. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，所述电信号的电压幅值小于 10V ，持续时间小于 $100\mu\text{s}$ 。

5. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，所述基于光吸收效应的电光调制器包括基于半导体掺杂技术的掺杂区域和一对与掺杂区域形成欧姆接触或肖特基接触的接触电极。

6. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，所述第一光波导和电光调制器的相对位置，可以在同一平面，也可以不在同一平面。

7. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，电光调制器掺杂区域中的自由载流子在电场作用下的移动方向，可以沿第一光波导的方向，也可以垂直于第一光波导的方向，掺杂区域可以在第一光波导的同一侧或两侧。

8. 根据权利要求1所述的一种通过光子计算单元在光域中进行运算的方法，其特征在于，所述光子计算单元还包括用于实现加法计算的光学器件和第二光波导，所述用于实现加法计算的光学器件称为光学加法器件，步骤S104后还包括以下步骤：

S201、将加数值编码到第二光波导的输入信号；

S202、光学加法器件对第一光波导的输出信号和第二光波导的输入信号进行耦合，产生输出信号强度，其中，乘积和加数值的和被编码在光学加法器件的输出信号强度中。

9. 用于片上大规模矩阵乘法运算的光子计算阵列，其特征在于：包括

基于载流子光吸收效应的光子计算单元；所述光子计算单元包括第一光波导和位于所述第一光波导上的基于光吸收效应的电光调制器；所述电光调制器利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域通过注入电流或施加电压以改变其自由载流子浓度，来改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，使得经过所述第一光波导的光信号被自由载流子吸收来实现乘法运算；

交叉开关矩阵架构；所述交叉开关矩阵架构由一组相互平行的输入行波导和一组相互平行的输出列波导交叉形成；

所述光子计算阵列中每一个输入行波导与输出列波导的交叉点处均存在一个用于乘法运算的所述光子计算单元，

每个所述光子计算单元的第一光波导通过波导耦合器件与邻近的波导耦合，所述波导耦合器件渐渐地耦合来自相邻的输入行波导的光功率的一部分，其中所耦合的光功率取决于所

述波导耦合器件的被放置为相邻的输入行波导并且平行于相邻的输入行波导延伸的部分的长度。

10. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：每个所述输入行波导和与其交叉的输出列波导的交叉点上都设置有交叉光波导。

11. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：所述输入行波导与输出列波导相互垂直。

12. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：所述不同行的输入行波导的输入光信号的光的波长不同。

13. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：所述输入光信号在波导耦合器件的作用下使其光功率平均分配至同一行上的每一个光子计算单元上。

14. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：所述光子计算阵列的输入行波导的行数和输出列波导的列数至少大于等于 2。

15. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：所述光子计算单元的尺寸小于 $100\ \mu\text{m}$ 。

16. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：作为外部激励的所述电信号的电压幅值小于 10V ，持续时间小于 $100\ \mu\text{s}$ 。

17. 如权利要求 9 所述的光子计算阵列，其特征在于：所述第一光波导和电光调制器的相对位置可以在同一平面，也可以不在同一平面。

18. 如权利要求 9 至 19 任一所述的光子计算阵列，其特征在于：所述光子计算阵列的输入行波导的输入端连接多路复用器 (MUX)，输出列波导的输出端连接解多路复用器 (DEMUX)。

19. 用于片上大规模矩阵乘法运算的光电混合计算阵列，其特征在于：包括一组光子计算单元，所述光子计算单元包括第一光波导以及光耦合到所述第一光波导的调制元件，所述调制元件根据所述自身状态来修改第一光波导的透射、反射、折射或吸收特性，其中，所述调制元件的自身状态能通过写入信号调整；所述状态表现为光波导对光的吸收系数 α 或折射率 n ；光输入信号通过所述光子计算单元后产生所述光输出信号，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码所述在光输出信号中；

一组光电转换器件，与所述光子计算单元的第一光波导的输出侧一一匹配连接，将所述光输出信号转换成电流信号，所述电流信号的大小与所述光输出信号的功率成正比；

交叉开关矩阵架构；所述交叉开关矩阵架构由一组相互平行的输入光波导和一组相互平行的电总线交叉形成；所述光输入信号通过所述输入光波导传输；

所述交叉开关矩阵架构中每个输入光波导和电总线的交叉点处均存在一个所述光子计算单元，每个所述光子计算单元的第一光波导的输入侧通过波导耦合器件与邻近的输入光波导耦合，所述波导耦合器件渐渐地耦合来自相邻的输入光波导的光功率的一部分，其中所耦合的光功率取决于所述波导耦合器件的被放置为相邻的输入光波导并且平行于相邻的输入光波导延伸的部分的长度；

每一条所述电总线上都接入有若干个并联的光电转换器件，所述电总线将通过该若干个并联的光电转换器件后转化的相应个数的电流信号进行求和，产生电输出信号，所述电流信号进行加法运算后的和被编码在所述电输出信号中。

20. 如权利要求 19 所述的光电混合计算阵列，其特征在于：所述输入光波导和电总线相互垂直。

21. 如权利要求 19 所述的光电混合计算阵列，其特征在于：所述不同行的输入光波导的光输入信号的光的波长不同或相同。

22. 如权利要求 19 所述的光电混合计算阵列，其特征在于：所述光输入信号在波导耦合器件的作用下使其光功率平均分配至同一行上的每一个所述光子计算单元上。

23. 如权利要求 19 所述的光电混合计算阵列，其特征在于：所述输入光波导和电总线的列数均大于等于 2。

24. 如权利要求 19 所述的光电混合计算阵列，其特征在于：所述电总线为光子计算芯片上的金属互联层。

25. 用于片上大规模矩阵乘法运算的光电混合计算方法，其特征在于，包括如下步骤：

S1、提供光电混合计算单元，所述光电混合计算单元包括相互连接的光子计算单元和光电转换器件，所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号；所述光电转换器件将所述光输出信号转换成电流信号，所述电流信号的大小与所述光输出信号的功率成正比；

S2、提供电总线，将通过若干个并联的光电转换器件后转化的相应个数的电流信号进行求和，产生电输出信号，所述电流信号进行加法运算后的和被编码在所述电输出信号中。

26. 如权利要求 25 所述的光电混合计算方法，其特征在于：所述步骤 S1 中“所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号”具体包括：

S11、提供一写入信号，将乘数值编码到该写入信号中；

S12、使用所述写入信号将乘数值映射到所述光子计算单元的状态，所述光子计算单元包括第一光波导以及光耦合到所述第一光波导的调制元件，所述调制元件根据所述自身状态来修改第一光波导的透射、反射、折射或吸收特性，其中，所述调制元件的自身状态能通过写入信号调整；所述状态表现为光波导对光的吸收系数 α 或折射率 n ；

S13、将被乘数值编码到所述光子计算单元的光输入信号；所述光输入信号通过所述光子计算单元后产生所述光输出信号，其中，乘数值和被乘数值的乘积被编码所述在光输出信号中。

27. 如权利要求 26 所述的光电混合计算方法，其特征在于：所述调制元件为基于光吸收效应的电光调制器，所述电光调制器利用电信号作为外部激励，在其掺杂区域通过注入电流或施加电压以改变其自由载流子浓度，来改变含自由载流子的光波导对光的吸收系数 α ，进而使得经过所述第一光波导的光信号实现乘法运算。

28. 如权利要求 26 所述的光电混合计算方法，其特征在于：所述调制元件为沉积在第一光波导上的相变材料；所述相变材料可选择通过光信号作为外部激励来改变自身状态，所述自身状态表现为修改含有所述相变材料的光波导对光的吸收系数 α 。

29. 如权利要求 25 所述的光电混合计算方法，其特征在于：所述步骤 S1 中“所述光子计算单元产生带有编码信息的光输出信号”采用马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 或微环结构 (MMR) 实现。

30. 如权利要求 25 所述的光电混合计算方法，其特征在于：所述电总线为光子计算芯片上的金属互联层。