1. 片上光网络的热效应
   1. 光发射机的热敏感性

光发射器通过调制VCSEL的驱动电流将电信号转化为光信号。基于近年的快速发展，VCSELs被应用到很多的片上光网络系统中。VCSELs对于温度参数特别的敏感。正如公式(1)的描述，发射波长是由腔共振导致的，这里的n代表谐振腔的平均反射系数，lvcsel是谐振腔内腔的长度，m是谐振腔的共振序。VCSELs发射波长受温度影响程度的主要决定因数是n，这个参数由材料的Bragg系数和内腔来决定。

对于发射波长在800-1000nm范围内的VCSELs来说，每度的温度变化，会导致0.07nm的波长的偏移，最大的偏移范围会达到0.32nm每度。对于一个1330nm的VCSEL的研究也显示了相似的实验结果[1.19]。随着温度变化的VCSELs门槛电流Ith遵循公式(2)描述的规律，这里alpha是最小的驱动电流，是与增益性质有关的系数，是当谐振腔波长对齐最高增益时的温度。

如果驱动电流高于了阈值电流，光发射器输出的功率会随着驱动电流线性增长。

* 1. 光路由单元的热敏感性

每一条光发射器和光接收器之间的光通路，是由很多的光路由单元组成。光路由装置将光信号路由到不同的波导直到抵达目标单元。图1-1中，我们使用了一个简化的微环模型展现了其路由功能。微环的峰值谐振波长符合公式(1-4)，是微环的单圈的周长，是一个表征这个微环的等级常量，是波导在微环中的反射系数。

和均是常量，所以谐振波长正比于。因为随着温度而变化，谐振波长也就随着温度而变化。理论分析和实验结果都验证了温度的变化和谐振波长的偏移之间存在着线性的关系。这个线性关系可以用公式(1-5)来表示，被定义为微环谐振波长的温度相关偏移量，是在初始温度时的谐振波长，是与反射系数相关的热光系数，是波导的群折射率。实验结果表明微环每度的温度变化下会发生50pm的谐振波长的偏移[1-22]。

在任何制造工艺下的谐振腔下，光损耗是始终存在的。与完美状况下的偏差程度被定义为质量系数，其与波导在内腔中的传输时间成正比。环状微波谐振腔的质量系数的定义如(1-6)所示，指谐振腔的谐振波长，是drop-port端口输出3dB功率对应的频带宽度，指输入波导和谐振环之间功率传输的摩擦系数，指输出波导和谐振环之间功率传输的摩擦系数，指环内的光损耗系数。在[1-24]中介绍了了质量系数从1500到100000的微环谐振腔。

微环谐振腔的功率传输函数是一个洛伦兹函数，其峰值位于微环的谐振波长。对于输入的波长为，drop-out端口的功率传输函数如公式(1-7-1)所示，through-out端口的功率传输函数如公式(1-7-2)所示。当，在峰值谐振点，几乎所有的功率都会被传输到drop-out端口，微环谐振腔只会产生很小的光损耗。物理实现表明一个微环谐振腔引入的光损耗可以降低到0.5dB。

根据公式(1-7),当入射波的波长与峰值谐振波长产生偏差时，会在drop-out端口造成很大的光损耗，特别是对高质量系数的微波谐振环来说。对于一个谐振波长在1550nm的微波谐振环，的温度变化会造成0.5nm的谐振波长的变化，进而会对其传输的光信号产生16dB的损耗。对于每条光连接来说，都会经过多阶的路由单元。随着经过多个路由单元，光信号强度会变得更加微弱。

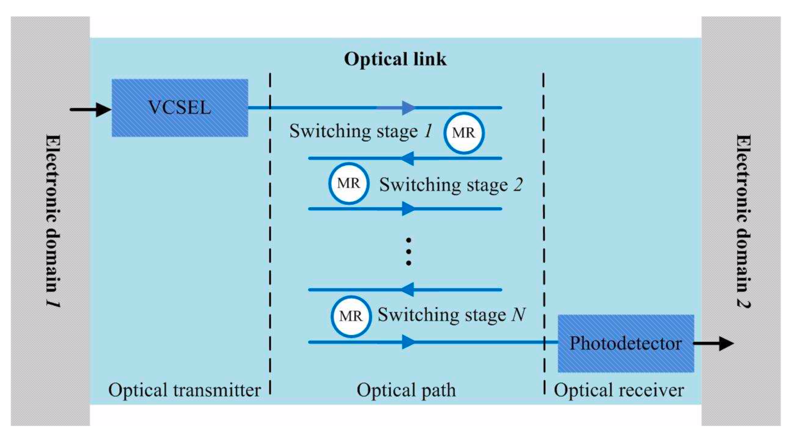


图1-1 光通路连接的示意图

Fig.1-1 the optical link in ONoCs connecting two electronic domains

* 1. 光接收器的热敏感性

光接收器使用光电探测器将光信号转化为电信号，以便于电信号域的处理器或存储器使用。因为在红外波段附近具有较高的吸收系数并且在COMS制造过程具有较好的兼容性，大多数光电探测器都使用作为吸收材料。通过将基于Ge工艺的光电探测器集成到高速TIA-LA电路中，一个10Gbps的光接收器在BER(a bit error rate)小于的条件下，可以达到-14.2dBm的敏感性。主要的关注点在于，当光电探测器处于高环境温度时，可能会产生较大的暗电流。研究表明，当温度从室温升高到，一个基于Ge-SOI工艺的光电探测器产生的暗电流会从20nA增加到192nA，但是接收器的敏感性没有明显的变化[1-30,31]。虽然光电接收器的暗电流会随着温度升高而升高，但是不会影响光电接收器的性能。基于以上的分析和观察，我们认为，光接收器的敏感性不会受环境温度变化的影响。

* 1. 片上光网络的热模型

为了确保片上光网络的正常工作，一个必要条件是光接收器接收的光信号功率不能比接收器的敏感性要小。这个条件可以用公式(1-10)来描述，是光发射器输入到链路中光信号的输出功率，是链路中所有路由单元产生的光损耗，是波导上产生的光损耗，而是光接收器的敏感度。

正如我们之前描述的一样，在高温度环境下，VCSELs的输出功率会恶化。当VCSELs被驱动电流驱动，该电流大于阈值电流小于输出功率会随电流升高而下降的电流节点时，我们可以通过公式(1-11)来表示，这里为VCSELs的工作温度，其他参数在1.1节已做描述。

环境温度的波动会造成会造成VCSELs的发射波长和路由单元的谐振波长之间的不匹配。VCSELs的发射波长会随着温度的变化发生线性的红移，如公式(1-12)的描述。为VCSELs在时的发射波长，为VCSEL波长随温度变化的系数。

微环谐振腔的谐振波长也会随着温度的升高发生线性的红移。对于一个工作在的微环谐振腔来说，谐振波长满足公式(1-13)，这里为时对应的谐振波长。

**正如上一节所**述，通过将路由单元进行连接，我们可以组成如图2所示多进多出的路由单元。路由单元的光损耗主要由drop-out端口损耗，through-out端口损耗，光链路交叉点光损耗组成。一个多进多出的光路由器的光损耗满足公式(hello-1),是光信号从端口i输入从端口输出时产生的光损耗，是光信号光信号从端口i输入从端口j输出时经过的drop-out端口的数量，是drop端口光损耗的dB比值，指光信号从端口i输入从端口j输出时经过的through-out端口的数量，指through端口光损耗的dB比值，是指光信号从端口i输入从端口j输出时经过的波导交叉节点的数量，指单个交叉节点产生的光损耗。

当光源从VCSEL发射，到光接收机接收光信号，需要经过多阶的路由器单元，根据不同的路由结构和不同的起始点和出发点决定。当一个光信号从节点出发，到达节点，经过了N个路由器单元时，其产生的光损耗满足公式(hello-17)。

基于以上的分析，我们得到片上光网络的热功耗模型如公式(1-15)所示。其中最后一项表示在波导上的光损耗。由于VCSEL的入射波长和微环谐振腔的谐振波长都容易受到温度的影响,这个热模型也显示芯片温度的突变会造成很大的光损耗，为了保证充足的光信号达到光接收器，更多的输入功率会被输入到光链路中。

1. 片上光网络结构

2.1 光基本开关单元

光基本开关单元通过改变微环谐振腔的谐振波长控制光信号的传输通路。通过不同的微环谐振腔的组合可以形成不同的路由控制结构。所有的光路由器原件都是由两种基本的1x2开关单元组成，**如图中所示，**包括平行开关单元和交叉基础单元。两个基础开关单元都是由一个微环谐振腔和2段波导组成。当微波谐振腔处于打开状态时，其对应一个打开状态谐振波长，波长为光信号会被谐振进微波的谐振腔中并导出到drop端口。当微环谐振腔处于关闭状态时，波长为光信号将直接从through端口导出。不同的多进多出路由单元可以通过配置该基本开关而实现。

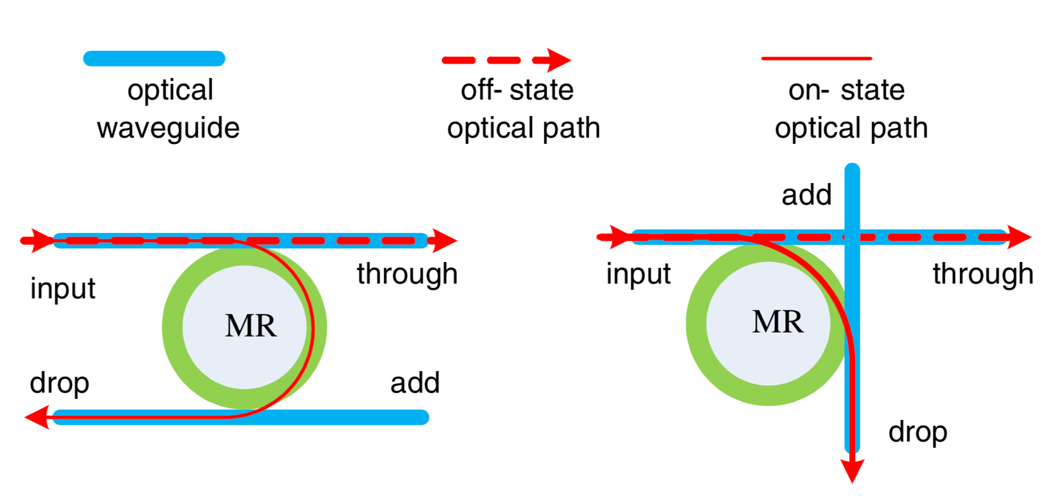


图2-1-1 水平开关单元 图2.1.2 交叉开关单元

Fig.2-1-1 parallel switching element Fig.2-1-2 crossing switching element

2.2 光路由结构

片上光网络是基于片上光路由器和光互联的网络结构。光路由结构是一个重要的组成结构，其实现了路由和流控制的功能。本文中，我们主要使用了Cygnus，其是在[2-14]中首次被提出。Cygnus是一个严格的非阻塞5x5光路由器，主要用来实现Mesh或者Torus网络结构。每个Cygnus路由都有5对双向的路由，包括injection/ejection、north、south、west和east端口。每一对 injection/ejection端口都可以通过光电转换接口和功能单元之间连接起来。功能单元可以是处理器或存储控制器。如图中所示，Cygnus路由结构主要有光基本开关单元和电控制单元组成。

正如上一节的描述，光基础开关单元控制光信号从输入端口到对应的输出端口。Cygnus优化了波导的交叉数量和功率消耗。其充分的利用through端口去尽量减少在微环谐振腔环中的功率消耗。如果光信号是在east和west端口之间或者在south和north端口之间传输，没有微环谐振腔会处于打开状态。当光信号必须要转弯或者使用到injection/ejection端口时，也只有一个微环谐振环处于打开状态。

电控制单元使用传统的CMOS工艺实现。其使用电信号通过开关不同的微环谐振腔去配置光路由器。每一个电控制单元也都有5个对应的端口。

2.3 光网络结构

我们的片上光网络结构中，有两层重叠的网络结构，包括数据传输光网络和一个控制电网络。数据传输光网络是由Cygnus光路由结构之间通过光互联组成。而控制电网络是一个将Cygnus控制单元通过金属导线连接起来的网络。我们通过将两层网络通过物理隔离放到3D芯片的不同层中，然后通过TSV连线将对应的单元连接起来。此外，控制信息和数据信息被分离为路由控制包和数据包，路由控制包通过电网络传输，以实现控制光路径的预定。数据包通过光网络实现快速传输。

拓扑结构决定了网络中节点的连接方式。在多步传输的拓扑结构中，数据包需要经过中间节点的转发到目标节点。在片上网络结构中，主要的拓扑结构包括Mesh结构和Torus结构。图2-3-1描述了一个4x4Mesh结构的3D片上光网络。该网络是一个基于TSV技术实现的两层3D芯片结构。光层网络集成了一个数据传输光网络，该网络将所有的Cygnus路由结构通过光互联材料连接起来。电层网络包含了Cygnus路由控制单元连接起来的网络。同时，每个路由控制单元都和一个功能单元之间相连。功能单元同时也通过EO/OE接口和对应的光基础开关单元连接。我们使用1-bit宽的双向光连接用于数据传输光网络，同时使用32-bit宽的金属数据链路用于传输路由控制信息。

1. 片上光网络的路由算法

路由算法决定了包数据包从起点刀终点的传输路径。高效的路由算法对整个系统的性能表现是十分重要的。片上光网络的路由算法按照路由的方式可以分为确定性路由和适应性路由。确定性路由是指，对于一对起始点对，分配的路由始终是一样的，代表性的算法有源路由和XY路由算法；适应性路由是指，对于任一起始点对，路由算法分配的路径会发生变化，代表算法有DyXY算法等。

3.1 XY路由算法

XY路由算法是一种维度有序的确定性路由算法。因为其简单有效，而被广泛的应用于2D-Mesh网络结构中。XY算法首先将在X方向上路由，然后在Y方向上路由。图3-1描述了XY算法中的可转弯路径。两种转弯选项是不可选的，算法描述了这个路由算法的伪代码。

**if** at destination **then** // 抵达目的地

**arrive**

**else if** destination is west **then**

go **WEST**

**else if** destination is east **then**

go **EAST**

**else if** destination is north **then**

go **NORTH**

**else if** destination is south **then**

go **SOUTH**

**end if**

3.2 West-First路由算法

West-First路由算法同样也是转弯模式算法。如果目的节点位于当前节点的西方向，包会首先向西方向路由，然后向北或者向南到达目的节点。如果目的节点不是位于当前节点的西方向，数据包可以任意的按照当前的位置的最小路径选项选择目标方向。图3-2描述West-First算法有效的转弯方向和无效的转弯方向。Algo2描述了这个算法的伪代码。

**if** at destination **then** // 抵达目的节点

arrive

**else if** destination in same column **then**

**if** destination is north **then**

go **NORTH**

**else**

go **SOUTH**

**end if**

**else if** destination in same row **then**

**if** destination is east **then**

go EAST

**else**

go WEST

**end if**

**else if** destination is west **then**

go WEST

**else if** destination is north **then**

go NORTH or EAST // 既可以向北也可以向东

**else if** destination is south **then**

go SOUTH or EAST // 既可以向南也可以向东

**end if**

3.3 Negative-First路由算法

Negative-First算法禁止了从正向方向到负向方向的转弯。正向方向是指东和南，负向方向是指北和西。图3-3展示了Negative-First算法允许的转弯方向。Algo3展示了该算法的伪代码。使用这个算法路由的包，当目标节点位于北方向时，可以动态的选择北或者东方向。当目标节点位于南方向节点时，可以动态的选择南或者东方向。

**if** at destination **then** // 抵达目的节点

arrive

**else if** destination in same column **then**

**if** destination in same column **then**

go **NORTH**

**else**

go **SOUTH**

**end if**

**else if** destination in same row **then**

**if** destination is east **then**

go **EAST**

**else**

go **WEST**

**end** **if**

**else** **if** destination is north east **then**

go **NORTH** or **EAST**

**else** **if** destination is north west **then**

go **WEST**

**else** **if** destination is south east **then**

go **SOUTH**

**else** **if** destination is south west **then**

go **SOUTH** or **WEST**

**end** **if**

3.4 Odd-Even路由算法

Odd-Even算法根据列的序号将列分为奇数列和偶数列。第一列的序号为0即为偶数列，第二列的序号为2，即为奇数列，以此类推。Odd-Even算法分别在奇数列和偶数列上禁止不同的转弯方向。在偶数列上，包被禁止做从西到南或者从西到北的转向。在奇数列上，包被禁止做从东到南或者从东到北的转向。

这个算法同样是Deadlock free的。如果要形成死锁，必须要形成环状的互相依赖的关系。也就是肯定存在最有方向的边。由于分别在奇数列和偶数列分别禁止了特定的最有边上可以存在的转弯方向，所以这里是没有环状依赖形成的，也就不会形成死锁。

相对其他的适应性路由算法，Odd-Even的适应性要更好。Algo4描述了Odd-Even算法的伪代码。

Valid Directions = ∅ // 可路由方向集合

**if** at destination **then**

arrive

**else** **if** destination in same column **then**

**if** destination is north **then**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **NORTH**) // 添加北方向到可选方向集合

**else**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **SOUTH**)

**end** **if**

**else** **if** destination is east **then**

**if** destination in same row **then**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **EAST**)

**else**

**if** this column is odd **then**

**if** destination is north **then**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **NORTH**)

**else**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **SOUTH**)

**end** **if**

**end** **if**

**if** destination is odd or more than one column away **then**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **EAST**)

**end** **if**

**end** **if**

**else**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **WEST**)

**if** this column is even and destination is not in the same row **then**

**if** destination is north **then**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **NORTH**)

**else**

**Set** Valid Directions = (Valid Directions ∪ **SOUTH**)

**end** **if**

**end** **if**

**end** **if**

adaptively choose a direction from Valid Directions // 动态的选择可选方向

3.5 Q-routing路由算法

Q-routing路由的主要目标是在网络中找到最佳的路由策略。Q-routing中使用Q-learning算法去找到当前的路由的最佳策略。路由的最佳策略通过Q-value表示出来。Q-value帮助路由器做出路由的选择。网络中的每个结点存储的Q-value代表了当前节点的网络状况。当路由到当前节点x，路由控制单元通过Q-value的值的大小选择一个最佳的相邻节点作为路由目标，直到到达目标节点。

当前节点需要发送数据包到目标节点，其相邻节点中的节点y，节点y需要将其最优Q值回传给节点x，如公式(3-3.5)。这里的表示y的相邻节点集合。

这里的表征了从z节点到目的节点的损耗。节点y会将本节点上的损耗累加。计算出，也就是表征y节点到目的节点的损耗。如公式(3-3-6)。其中表示y节点上的损耗

节点x收到节点y反馈的值后，会更新本地Q-table中的，更新算法如下公式(3-3-7)。

这里指Q-value的更新速率，其决定了新Q值更新旧值的速率。其范围在0和1之间，0表明不会学习新的Q值，1表明使用最新的Q值。

Q-routing算法通过Q-learning算法更新每个节点中的Q-table，路由选择中根据本地Q-table做最优路由的选择。

1. 相关工作介绍
   1. 光学器件的热敏感性

在片上光网络的研究工作中，光学装置的热敏感性问题已经有过比较广泛的讨论。对于基于硅工艺的微环谐振腔来说，受温度影响的波长偏移达到了50-100pm/K，这在实际环境中是不可忽略的[aehr-Jones et al. 2005; Padgaonkar and Arbor 2004; Dumon et al. 2006]。此外，对于VCSEL(Vertical cavity surface emitting laser)的热敏感性的研究表明，其受温度影响的波长偏移和微环谐振腔是一个量级的，甚至会更加严重[Michalzik and Ebeling ; Mogg et al. 2004]。进一步来说，VCSEL的发射波长和峰值增益下的谐振波长之间的不匹配会随着温度升高而变得更加严重，这样在高温环境下，导致VCSEL的功率损失严重[Syrbu et al. 2008]。对于基于Ge工艺的光电探测器，研究表明其对温度的变化不敏感，光学特性在高温时，没有明显变化。

为了解决硅工艺的微环谐振腔在高温下谐振波长偏移的问题，一些设备级的热兼容性方案被提了出来。本地加热器进行thermal-tuning是可选方案之一， [Gan et al. 2007; Geng et al. 2009]。其确定是加强速度比较慢并且功率损耗比较大。另一个方案是使用热敏感更低的材料生产微环谐振腔。[Lee et al. 2007; Raghunathan et al. 2010]中，其使用了合适的材料作为MR的上表层，达到了更低的温度敏感性甚至是对温度不敏感的。但对于CMOS工艺的MR来说，依然会面临热兼容性问题。

从系统级层面来看，为了降低温度分布不均匀的问题，实时热管理技术和D-VFS(dynamic voltage and frequency scaling)已经被提出来[Li et al. 2010; Zhang et al. 2014]。由于热管理技术的性能限制，设备级的热兼容技术依然是需要的。在[Ye et al. 2012]工作中，作者系统性提出了片上光网络的的热模型并且提出了几项低热敏感性的技术。在[Li et al. 2015a]的工作中，作者基于稳定状态热分析和信噪比分析，提出一种面向热敏感性的设计片上光网络中VCSELs分布的方法。

从网络层级的角度来看，适应性路由已经被应用到片上光网络的路由工作中。适应性路由可以根据网络状况动态路由。在[Xiang et al. 2013]中，作者提出了一种容错且deadlock-free的路由算法。该路由算法可以提高片上光网络整体的稳定性，降低光互联器件受温度波动和制造工艺不稳定的影响。此外，一种利用node-reuse技术实现的动态路由算法可以容忍片上光网络中MR信号错误，这可以有效的提升包传输的延迟性能和降低信噪比[Guo et al. 2015]。在[Yang and Ampadu 2016]的工作中，作者提出了一种面向热敏感性的容错路由结构。该路由结构采用动态路由的方法解决片上温度分布不均匀的问题。在[Asadi et al. 2016]中，作者提出将turn-model动态路由算法引入到片上光网络的结构中，用来优化光网络中光损耗问题。实验证明，相对确定性路由，动态性路由可以有效的降低光损耗，对于不同的动态路由算法，可选路径越多，优化效果越好。

1. 功耗优化方法
   1. 基于thermal-tuning的功耗优化方法

由于热光tuning技术可以大范围的调节光材料的光学系数，其已经被广泛的应用到光过滤系统中。片上光网络的系统需要使用一连串悬挂的微波谐振腔。由于普通的微环谐振腔缺少包裹层，使得其不具备自动调节微环光学性质的能力。这使得微环谐振腔装置成为了光学性质不稳定的器件，限制了其可用性。因此为了使微环谐振腔成为更加可靠稳定的光学组件，其光学特性必须变得更加稳定可靠。

通过探索热光效应，一些关于调节微环谐振腔光学性质的技术已经被提出来。例如通过使用Peltier元素样例芯片[5-6]或者在装置中注入一个激光器，将激光器光能转化为热能[5-3]。在[5]中，作者利用热光效应设计了一个电加热装置，实现了一种全集成的tuning个技术，该技术可以可控的调节片上的组件，将微环谐振腔比变为了一个主动可调节的器件。

通过主动的调节微环谐振腔的光学特性可以有效的缓解装置的热敏感性导致的功耗剧增的现象。在应用thermal-tuning技术时需要对装置进行一个初始设置。由于可靠的thermal-tuning技术只能通过点加热电路对光学器件的谐振波长进行红移，不能向相反的方向对谐振波长进行调节。如果微环谐振腔的谐振波长比入射光的波长小，通过thermal-tuning技术可以将谐振波长红移至入射光的波长。注意微环谐振腔的谐振波长是周期的，周期有分离的两个谐振腔之间的空间间隔(FSR, Free Spectral range)决定，其大小在10几个纳米的量级。如果微环谐振腔的谐振波长比入射波长大，为了去匹配入射波长，我们需要将微环谐振腔的谐振波长调节一段更长的距离­。为了去减少thermal-tuning导致的功率消耗，我们提出了一种初始装置设置的方法，该方法可以有效的减少thermal-tuning的调节距离，进而减少功率的消耗。

对于一个位于路径中的微环谐振腔来说，假定其工作在温度下，其谐振波长满足公式(1-13)，这里表示室温时的谐振波长，波长随温度变化的系数，指当前环境温度。理论分析和实验数据都表明，谐振波长和环境温度之间存在线性关系。假定位于起始节点的激光源工作在温度下，并且光源波长满足公式(1-12)。为了确保谐振波长始终都可以通过thermal-tuning技术红移匹配到入射波长，对应于室温下的初始微环谐振腔谐振波长必须满足下列公式(5-1)的要求。这里我们假设片上温度的可变范围为。

根据我们的初始设定，微环谐振腔的谐振波长始终比光源的入射波长要小，因此thermal-tuning技术可以利用红移来将谐振波长和入射光源的波长匹配起来。调节距离满足公式(5-2)。

根据调节距离，我们可以估算出thermal-tuning所消耗的功耗，其满足公式(5-3)。

* 1. 基于路由的功耗优化方法

路由算法可以被分为确定性路由和适应性路由。对于Mesh结构或者Torus网络结构来讲，传统的基于方向顺序的路由算法是一种确定性路由，对于同一起始终点对，其总是选择相同的路径。由于确定性路由的特性，其不能根据网络状况的变化，选择可靠的路径。与确定性路由不同，适应性路由可以根据网络状况的不同做出不同的路由决定。Q-routing是一种基于Q-learning算法的适应性路由算法。基于Q-routing算法的片上网络结构中，网络中每个节点都保存一个Q-table，该表存下了当前节点的Q-value。Q-value代表可选路径的质量或者是损耗(例如网络拥堵层度)。每个节点通过接受相邻节点发来的Q-values更新当前节点的状况，并利用Q-tables中值动态的做出路由决定。

在片上光网络中，片上温度分布的不均匀会导致很引起很严重的光损耗和功率消耗。我们提出了一种基于学习算法的动态路由算法来优化片上光网络的路由选择。实验结果也表明该算法可以有效的减少片上光网络上的能量消耗。

5.2.1 E-value

在传统的基于Q-routing的片上电网络中，Q-values用来代表可选路径的延迟状况，Q-learning算法也是用来降低网络的拥堵状况。其主要用来优化延迟情况。对于片上光网络上温度不平衡导致的功耗问题，我们专注于优化温度引起的功耗问题。在Mesh或者Torus网络结构中，存在一系列最短路径。这些路径被提供给路由选择算法。我们使用Q-learning算法得到网络和温度相关的功耗状况并且为每一对起始终点路径对找到最优的消耗能量最小的路径。

片上光网络的每一个节点都保存有一个E-value，其保存E-values。E-values代表了可选路径的预估光损耗。每个节点都通过接受相邻节点发出的E-values包学习本地的网络状况。当一个节点接收到从相邻接点发出更新好的E-values值，该节点就会更新本地的E-table中对应的E-values。

[5] Integrated Thermal Tuning of Suspended Micro-Resonators.