arXiv:2301.03657v1 [physics.optics] 9 Jan 2023

磷化铟单片集成波长计，测量带宽为100 nm，中心位于C波段。

ANDREA VOLPINI[1,*]、DAMIANO MASSELLA[1]、DAVID ALVAREZ-OUTERELO[1]、FRANCISCO SOARES[2]和FRANCISCO J.DIAZ-OTERO[1,3]

[1]维戈大学，*El Telecomunication - Campus Universitario As Lagoas，36310* 维戈，西班牙[2]*Soares Photonics*，里斯本，葡萄牙。[3]*AtlanTTic*研究中心，*El Telecomunication - Campus Universitario As Lagoas，36310*维戈，西班牙[*]通讯作者：*andrea.volpini@uvigo.es*

编译于*2023*年*1*月*11*日

本文将探讨在磷化铟中单片集成波长计的实现。这类器件是许多应用的关键需求，尤其需要将其与激光器和增益区等有源器件集成。我们介绍了一种基于多环谐振器的波长计，该器件通过商业多项目晶圆流片制成，并使用可调谐激光器进行了测试。

所设计的电路理论上可实现低至 1.6 皮米的分辨率，并可在 100 nm 的波长范围内达到低至 500 ps 的测量速度。

© 2023 Optica出版集团

http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX

1. 引言

光波长的测定并不限于电信应用，在波分复用、光谱学、可调谐激光器控制和计量学中也有多种应用 [1–3]。

在所有集成光子学平台中，磷化铟（InP）是唯一能够实现激光器和光学增益区单片集成的平台[4]。波长计能够与激光器共集成至关重要，因为这有助于更好地控制集成式可调谐激光器，同时享有集成带来的所有优势：占用面积更小、性能更优、制造更简便。

磷化铟平台相较于其他平台还有第二项优势：得益于高速调制器，它能够实现更高的运行速度，并为未来集成到更先进、更紧凑的光子系统提供了可能。

文献中已报道了多种不同的集成式波长计设计 [2, 5, 6]。这些研究均聚焦于硅或氮化硅平台，并采用了环形谐振器或基于多模干涉仪的差分传输等不同技术。

迄今为止最显著的成果是在测量范围（100纳米）和精度（15皮米）方面均实现了良好性能 [7]。

与硅和氮化硅平台相比，磷化铟平台的性能较差，因为其无源器件损耗更高，且平台采用的弯曲半径更大。这使得设计具有较大自由光谱范围的环形谐振器尤为困难，而环形谐振器正是波长计设计的核心。
迄今为止，磷化铟平台上报道的最大带宽为 3 nm [8]。

本文提出的设计专门通过采用不同的环形谐振器，旨在缓解磷化铟平台的局限性。

在我们的设计中，为了实现较高的工作带宽，我们采用了四个微环谐振器，每个谐振器都包含一个可实现 2π 相移的相位调制器，且环的直通端口连接到一个独立的光电二极管（PD）。环的长度不同，因此自由光谱范围（FSR）也各不相同，可用于增大系统的工作带宽。该装置通过调制环形谐振器谐振的光谱位置并监测 PD 的输出进行工作。随后，通过检查在何种调制器偏置下环形谐振器透射达到最小值，获得波长测量结果。这些信息构成一组包含 4 个值的数据，之后将其与校准期间获得的查找表进行比较，以估算光的波长。

所提出的设计采用弗劳恩霍夫海因里希·赫兹研究所（HHI）的通用磷化铟（InP）平台制造。本快报中的实验结果是在维戈大学使用定制光子学装置获得的。

2. 方法

如图1 所示，电路示意图如下。该器件通过将单色光源路由至四个微环谐振器来工作。每个环都包含一个相移器（PHS），可通过电控改变环的谐振。请

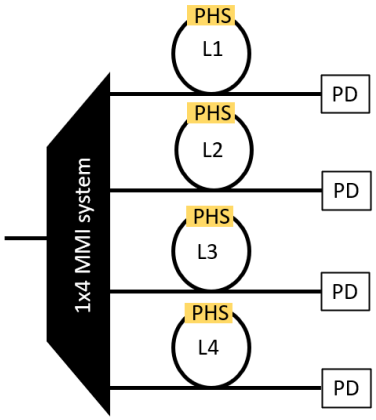


图 1. 电路示意图。未知的单色光源通过多模干涉分束器的组合，被引导至四个长度不同的环。相位调制器（黄色方框）用于调节环，使其与光源谐振。使用光电探测器（PD）记录透射光谱。

注意，环上没有“下载”端口。这样可以避免不必要的损耗，从而获得更高的腔品质因数。

将 $\theta(I)$ 称为相移器引入的相位，与环谐振的波长子集由以下表达式定义：

$$\lambda(k) = \frac{L \cdot n_{eff}}{k + \dfrac{\theta(V)}{2\pi}} \tag{1}$$

其中 $k \in \mathbb{N}$，L 为环长，$neff$ 为有效折射率，V 为施加到相移器上的电压。

如前所述，相位 $\theta(V)$ 可通过控制施加电压 V 的值来改变。如果相移器足够长，则 $\theta(V)$ 可以大于 2π，从而可调节环，使其与任何输入波长谐振。谐振条件很容易辨认，因为达到谐振时，光电探测器检测到的功率最小。

方程1 无法定义电压 V 与波长 λ之间的一一对应关系。换言之，单个环只有在其自由光谱范围（自由光谱范围）宽于未知光源的波段时，才能单独用作波长计。通过精心设计不同长度的环，可以克服这一问题。这是因为不同长度的环在相移器电压 V下对应不同的可能谐振集合。这些集合的交集可确定输入波长。为获得这样的波长集合，系统按以下方式运行。

待测光源耦合进入器件，并在探测器处测量透射强度。驱动相移器以扫描相位 $\theta(V)$，扫描范围为 $[0, 2\pi]$，这样所有光电二极管的透射率都会至少出现一个最小值（图3），该最小值可关联到各个环特有的驱动电压 V。根据每个独立的谐振电压，可推导出可能谐振波长的子集。

值得指出的是，要准确预测这类波长集合，需要建立一个详细模型，涵盖群折射率色散、相位控制、温度依赖性和制造缺陷。鉴于这项任务的难度，更简单的做法是对系统进行外部校准，以便创建一个将波长与特定电压关联起来的查找表。

3. 环形谐振腔设计

为了扩展带宽，必须设计长度各不相同的环。最好从设计环L_1，开始，并尽可能缩短其长度。事实上，环越短，传播损耗越小，因此可获得更高的Q 因子，谐振的半高全宽（FWHM）也会更小。这一点至关重要，因为 FWHM 决定了器件可实现的分辨率下限。较短的环还具有更宽的自由光谱范围（FSR），从而更容易扩展可检测带宽。

通常，环的最短可实现长度受多项设计约束限制。每个环都必须包含：一个具有适当长度、能够确保耦合的定向耦合器；一个长度足够、能够确保至少产生 2π 相移的 PHS；以及两个曲率半径为平台所能提供的最小值的 180度弯曲段。

我们在 HHI 平台上设计的最短环长度为 $l = 3318\mu m$。我们将这个环称为 L_1。设计该环时，我们担心无法实现高达 2π 的相移。因此，我们采用了长度为 $800\mu m$ 的 PHS。从图 3可以看出，我们本可以不必如此保守。长度为 $300\mu m$ 的 PHS 同样可行，并且产生$5\ V$ 左右的电压即可实现 2π 相移。

$$FSR = \frac{c}{n_g L} \tag{2}$$

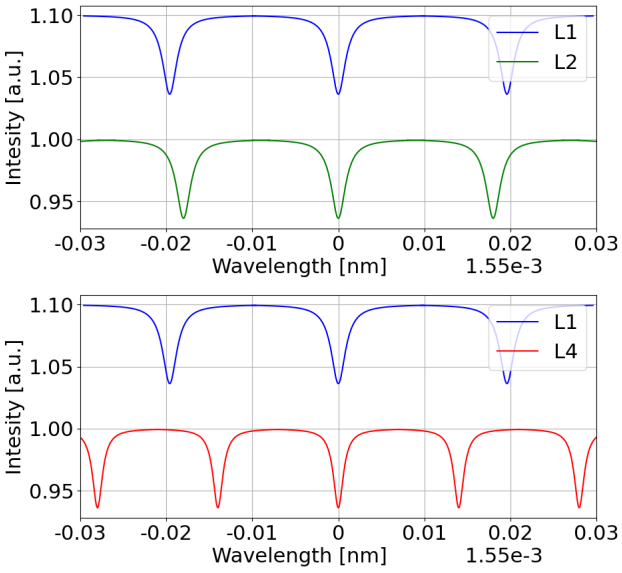


图2。 上图：环形谐振器 L1 和环L2 的自由光谱范围相近，因此无法在该区间内明确区分谐振。下图：环形谐振器 L1 和环 L3 的光谱范围不同，因此可以在所选区间内无歧义地确定波长。

对于环 $L1$，假设有效折射率为 $neff = 3.5$，使用公式 2 我们预计自由光谱范围接近 25 GHz（$0.2nm$），中心频率为

193THz。通过一种类似游标效应的工艺，可以扩展器件的工作带宽。

方程 3 [9] 预测了两个长度为l_1, l_2的环的组合自由光谱范围。我们可以验证，长度为$L_2 = 3324\mu m$ 对应于 自由光谱范围$_{1-2} = 14.3THz$ (100nm)。

$$FSR_{1-2} = FSR_1 \frac{L_1}{L_1 - L_2} \tag{3}$$

然而，仅凭这一点还不足以确定如此宽广光谱范围内未知波长的位置。借助图2，我们可以更好地理解这个问题。上方图中模拟了环L_1 和L_2 的光谱。

由于谐振的半高全宽有限，我们无法确定谐振是在 1550.00nm 、1550.02nm 还是 1449.98nm。而在下方图中，我们可以看到比较L_1 和L_4的光谱时会发生什么。L_4 的长度为$l_4 = 3578\mu m$ ，使得自由光谱范围$_1$ −自由光谱范围$_4$ > 半高全宽。这种简并现象已消除，因此我们可以断定两个环共有的谐振位于 1550.00nm。但为什么不只使用环L_1 和L_4 呢？因为这样一来，新的组合自由光谱范围 仅为 3.318nm。根据我们的仿真，仅使用三个环不足以准确覆盖 100nm 宽的频带，因为光谱中存在一些区域，无法识别出唯一的波长。为最终解决这一问题，我们加入了环L_3 ，其$l_3 = 3578\mu m$。

4. 校准流程

目前，我们已测试在 1550nm 处扩展 1nm带宽的概念。对于如此有限的带宽，环 L_1 和 L_4 足以无歧义地确定波长。为此，我们使用已知波长的激光源，并以 20nm为步长采集光电探测器响应。在图 3 中，我们可以看到在 1549.96nm处对最短环的采集结果。我们观察到许多峰，这说明我们高估了所需相移器的最小长度，因此可以使用更短的相移器。这些峰明显分为两类：特别是，奇数峰比偶数峰深得多。这可能是由两种不同光学模式的传播造成的，可能分别是基模 TE 和 TM。在校准时，我们决定只考虑前三个奇数峰，因为它们在所有采集结果中都清晰可辨。对于每个波长步进，我们都存储了这些峰对应的电压。我们对环 L_1 和 L_4。

在图 4 中，我们绘出了该电压的平方与相应波长的关系。绘制平方值是因为 PHS 由热控制，耗散的电功率与电压的平方成正比。每一组共振都通过线性函数进行拟合。利用该拟合可以创建一个查找表，将两个电压（V_1,V_2）与相应的波长关联起来。图 5 的相图中展示了查找表中的所有数据。横轴表示施加到环 L_1, 上的电压平方，纵轴表示施加到L_2上的电压平方。相空间中的点由一对数值（V_1^2,V_2^2）标识。点的颜色根据右侧的色标表示波长。图中还显示了误差棒，其数值通过计算实验点相对于预测拟合模型的标准差得到。可以看出，这些误差棒对应的波长不确定度为 ±1.5皮米

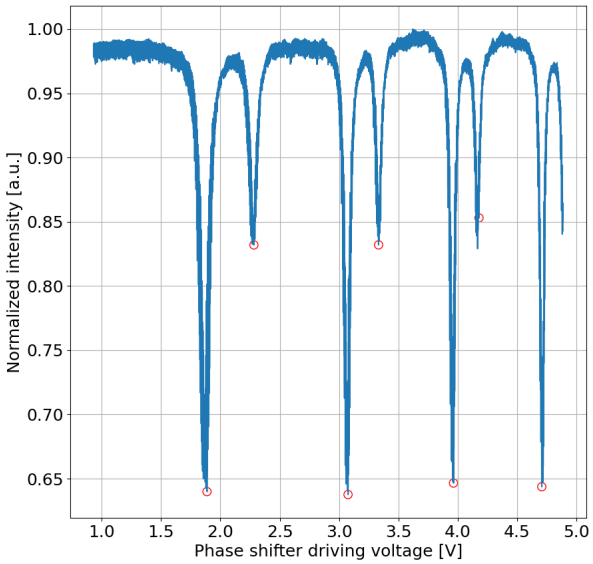


图 3. 波长为 1549.96 时环形谐振器 L1 的测量响应。该图通过扫描 0V 至 5V 之间的电压，并记录集成光电二极管上的功率得到。使用峰值检测算法，我们可以确定与极小值对应的电压。观察到两组深度不同的峰后，我们决定在后续分析中仅考虑奇数峰。

对于估算波长。要操作波长计，需要使用一个脚本，将实验测得的（V_1,V_2）与相应的波长关联起来。尽管误差棒范围较大，在所测试的 1纳米范围内，始终能够识别出唯一的波长。

5. 读取速度限制

我们发现，估算波长所需的速度存在一个下限。该限制与光在环中的传播有关。事实上，环形谐振器具有典型的腔寿命，该寿命由Q 因子决定：$Q = \omega\tau_s$ 。在将环视为已稳定之前，必须经过时间$T = 3\tau_s$ [10]。为了覆盖任一环的完整自由光谱范围，我们需要确定施加于相移器的电压步数。我们选择了步数m，既避免损失分辨率，也避免对光电探测器响应进行过采样。鉴于极限分辨率等于环的半高全宽：

$$m = \frac{2FSR}{FWHM} = \frac{2FSR \times Q}{\omega} \tag{4}$$

我们可以用 Q 来表示该方程，从而估算完成测量所需的时间T：

$$T = m\tau_s = \frac{6FSR \times Q^2}{\omega^2} \tag{5}$$

从这个方程可以看出，测量速度与品质因数的平方成正比。在下表中，我们估算了单个环的自由光谱范围固定为 = 30GHz 和 $\omega = 193$ THz 时，器件在不同品质因数下的测量速度。

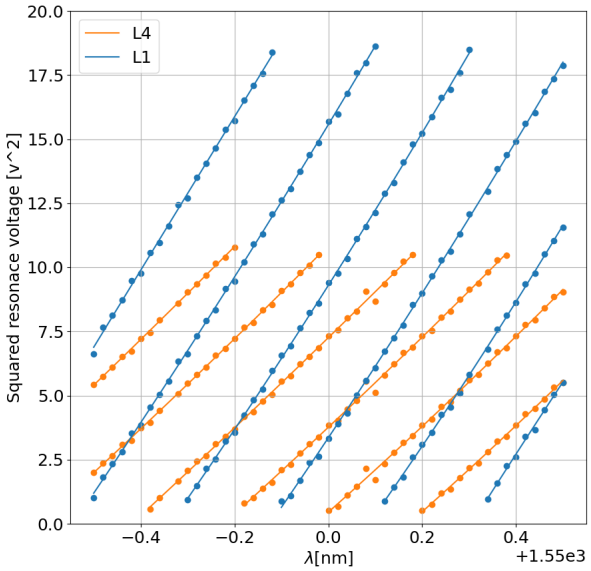


图 4. 环形谐振器 L1 和环形谐振器 L4 随注入波长变化的峰值电压，图中每个点对应一个极小值：红点为环形谐振器 L1 的极小值，蓝点为环形谐振器 L4 的极小值。数据通过二次函数拟合，以创建查找表。

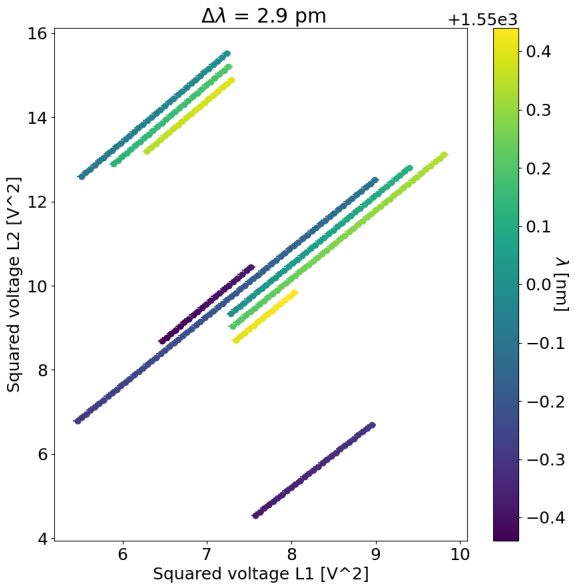


图 5. 查找表的可视化。坐标轴上展示的是图 4 中对两个不同环进行拟合后得到的电压。对应波长以颜色编码，点之间相隔 皮米。

表 1. 该表展示了腔的品质因数、最短测量时间和测量分辨率之间的关系。结果通过应用方程 5 得出。

品质因数	T	分辨率
10^4	$500ps$	160皮米
10^5	$50ns$	$20pm$
10^6	$5\mu s$	1.6皮米

需要特别说明的是，测量速度不取决于环的数量，因为所有环都是同时测量的。

6. 结论

基于多个环形谐振器的光子集成波长计已在磷化铟上实现。已验证该器件在1nm的有限带宽内能够正确运行。预计将开展新的测量，以验证其在100nm范围内的稳定性和可靠性。此外，在实现引线键合连接后，将能够测试该器件的最大读出速度。

7. 致谢

本项目是在欧洲磷化铟光子集成电路制造技术博士项目（EDIFY）的框架下开展的。本研究获得了 MSCA H2020-ITN-2018-EDIFY（合同编号 813467）的资助。

8. 信息披露

作者声明不存在利益冲突。

参考文献

1. C. Xiang, M. A. Tran, T. Komljenovic, J. Hulme, M. Davenport, D. Baney, B. Szafraniec, 和 J. E. Bowers, 《光学快报》**41**, 3309 (2016). 2. R. M. Oldenbeuving, H. Song, G. Schitter, M. Verhaegen, E. J. Klein, C. J. Lee, H. L. Offerhaus, 和 K.-J. Boller, 《光学快报》**21**, 17042 (2013). 3. T. Komljenovic, L. Liang, R.-L. Chao, J. Hulme, S. Srinivasan, M. Dav- enport, 和 J. E. Bowers, 《应用科学》**7** (2017). 4. M. Smit, X. Leijtens, E. Bente, J. van der Tol, H. Ambrosius, D. Rob- bins, M. Wale, N. Grote, 和 M. Schell, “基于磷化铟的光子集成电路通用代工模型”, 载于光纤通信会议, （美国光学学会, 2012）, 第 OM3E–3 页。5. R. Dey, J. Doylend, J. Ackert, A. Evans, P. Jessop, 和 A. Knights, 《光学快报》**21**, 23450 (2013). 6. C. Taballione, T. Agbana, G. Vdovin, M. Hoekman, L. Wevers, J. Kalk- man, M. Verhaegen, P. J. van der Slot, 和 K.-J. Boller, “ 基于集成微环谐振器的抗温度漂移波长计 ”, 载于集成光学: 物理与仿真 *III*, , 第 10242 卷, P. Cheben、J. ˇCtyroký 和 I. Molina-Fernández 编, 国际光学与光子学学会（SPIE, 2017）, 第 39–48 页。7. P. Wang, A. M. Hatta, H. Zhao, W. Yang, J. Ren, Y. Fan, G. Farrell, 和 G. Brambilla, 《光学快报》**25**, 2939 (2017). 8. R. Broeke, D. Melati, F. Morichetti 等, “封装式磷化铟波长计的设计与性能”, 载于 *IEEE* 光子学比荷卢分会第 *18* 届年度研讨会, (2013), 第 287–290 页。9. T. Komljenovic, L. Liang, R.-L. Chao, J. Hulme, S. Srinivasan, M. Dav- enport, 和 J. E. Bowers, 《应用科学》**7** (2017).

10. S. Biasi、P.Guilleme、A. Volpini、G. Fontana 和 L. Pavesi，《J.Light. Technol.》**37**，5091（2019）。