高性能铌酸锂波导交叉结构的设计与谐振器辅助表征

性能铌酸锂波导交叉结构

Yikun Chen，[1] Ke Zhang，[1] Hanke Feng，[1] Wenzhao Sun，[2,3] Cheng Wang[1,4]*

[1]*De*香港，中国香港九龙，香港城市大学电机工程学系

[2]香港城市大学东莞研究院物联网中心，中国东莞

[3]香港城市大学深圳研究院信息与通信技术中心，中国深圳

[4]太赫兹与毫米波国家重点实验室，香港城市大学，中国香港九龙

*通讯作者： *cwang257@cityu.edu.hk*

摘要

波导交叉结构是光子集成电路中用于信号路由的基本无源器件。在此，我们设计并表征了两种基于多模干涉仪（MMI）的波导交叉结构，以适应各向异性 x 切薄膜铌酸锂（TFLN）平台中的不同布线方向。为解决传统截断法表征方法中较大的测量不确定性，我们提出并验证了一种谐振腔辅助方法，仅使用两个器件即可大幅降低插入损耗测量的不确定性（< 0.021 dB）以及串扰测量的下限（-60 dB）。基于该方法，我们演示并验证了在 1550 纳米波长下沿全部三种布线方向工作的 TFLN 波导交叉结构，其插入损耗为 <0.070 dB，串扰为 < -50 dB。本工作的低损耗、低串扰波导交叉结构，结合简单高效的表征策略，有望为未来大规模经典与量子薄膜铌酸锂光子电路提供重要的版图设计灵活性。

引言

光子集成电路（PICs）是下一代通信与计算系统的理想选择 [1]。然而，与利用复杂三维路由结构（如垂直通孔和水平互连）实现低插入损耗、紧凑型多层信号路由的电子超大规模集成（VLSI）不同，光子集成电路难以实现相应的光学方案，因为光学通孔在垂直弯曲段处会因折射率急剧变化而产生较高损耗。尽管可以采用多层波导，并通过绝热锥形波导将其连接起来 [2], ，但所需的制造工艺复杂且成本效益低。相比之下，光子互连可以

通过二维波导交叉结构以平面方式彼此交叉，这种结构颇具吸引力，因为只需一次光刻即可实现，且易于制造。它们已应用于实现紧凑型光调制器 [3], 、光计算系统 [4], 、量子系统 [5], 等。尽管单个波导交叉结构的插入损耗和串扰看似较小，但这些指标对性能至关重要，尤其是对于大型光子集成电路而言，因为其中会采用大量波导交叉结构，损耗和串扰也会逐级累积 [4, 5]。尽管有些人致力于通过优化布线算法来减少波导交叉结构的数量 [6], ，提升波导交叉结构的性能仍是重要的研究主题 [7-12]。

迄今为止，人们已基于多种原理实现了高性能波导交叉结构，包括逆向设计[7], 高斯光束合成[8], 亚波长光栅[9], 以及多模干涉（MMI）[10-12], 等。基于多模干涉的设计因设计简便、制造鲁棒性高且性能良好而成为应用最广泛的方法。这类设计已在硅[10], 聚合物 [11], 和氮化硅 [12] 平台上得到验证。然而，针对薄膜铌酸锂（TFLN）的研究仍然很少。薄膜铌酸锂凭借低光学损耗、高非线性系数以及可获得大尺寸商用晶圆（最大达 6 英寸）的优势，正成为大规模光子集成电路（PICs）的新兴候选材料。得益于这些特性，高品质因数（品质因数）微谐振器[13], 高速电光调制器[14], 和宽带频率梳[15] 均已实现。要在未来的大规模光子集成电路中对这些器件进行布线和互连，开发高性能薄膜铌酸锂波导交叉结构至关重要。另一方面，传统的波导交叉结构切回法表征往往存在较大的测量不确定性，尤其是在插入损耗较小时，因为光纤-芯片耦合损耗（~5 dB/端面）[16] 通常远大于单个交叉结构的芯片上损耗（ <0.1 ± dB），0.4 且不同器件之间的差异很大（通常为 dB）。边缘耦合装置中芯片端面反射所产生的法布里–珀罗干涉条纹，进一步增加了准确测定总光学损耗的难度。因此，为了获得较为可靠的估算，这类测量通常需要采用大量级联交叉点，并对多个器件的测量结果取平均。准确测量这些交叉结构的微小串扰值也颇具挑战，因为测量下限（噪声底）很容易受到芯片其他部分散射光的影响。

本文针对这些问题提出了一种谐振器辅助测量方法，将待测波导交叉点嵌入高Q谐振器中。作为概念验证，我们在X切薄膜铌酸锂芯片上沿三个布线晶体方向设计并制备了低损耗的基于MMI的波导交叉，并采用所提出的方法对器件进行了精确表征。实验结果表明，与传统切回法相比，该方法显著提高了插入损耗测量精度，并降低了串扰测量底限。

结果

图1(a)示意性地展示了传统截断法以及我们提出的谐振器辅助插入损耗与串扰表征方法。传统截断法通过比较具有不同级联交叉点数量的多个波导的传输光谱，并进行线性拟合来获得插入损耗 [7, 8, 10-12], 其中，对光纤-芯片耦合的不准确估计以及由芯片端面产生的法布里-珀罗条纹，都会增加最终的测量不确定度 .
相比之下，我们的基于谐振器的方法通过比较参考微环谐振器与嵌入交叉结构的谐振器的Q因子，提取往返损耗之差，因此不受光纤-芯片耦合不确定性的影响。如果本征损耗远低于交叉点损耗，该方法也不易受到器件间制造偏差的影响。此外，由于我们只关注光谱上较窄的谐振凹陷，尤其是对于高Q谐振器，因此也能减轻法布里-珀罗条纹的影响。对于串扰表征，传统方法通过比较单个交叉结构的直通端口和交叉端口的透射水平来进行测量，需要较大的输入功率才能显现较小的串扰值，而且容易受到芯片其他部分散射光的影响，从而限制了我们能够测得的最小串扰值

。相反，我们的谐振器增强方法能够通过放大高Q谐振器中的串扰功率，有效地将串扰信号从噪声底中提取出来。

为实验验证我们提出的谐振器辅助测量方法，我们首先设计了两种低损耗波导交叉结构，以适用于各向异性 x 切铌酸锂（LN）薄膜中的三种常用布线方向，如图 1(b) 所示。具体而言，左侧交叉器件沿 y/z 晶体方向排列，使沿 z (0°) 和 y (90°) 方向传播的信号能够以低串扰相互交叉；由于 y 和 z 晶体方向上的折射率不同，因此需要采用非对称设计。另一方面，右侧交叉器件沿 y 与 z 之间的 45° 方向进行布线，可通过对称设计实现。我们使用全三维时域有限差分（FDTD）仿真（Ansys Lumerical）对多模干涉结构进行数值仿真。仿真采用 LN 的各向异性折射率，以计算不同布线晶体方向上的插入损耗和串扰。根据典型的薄膜铌酸锂器件参数，布线波导的顶部宽度、脊形波导厚度、脊形波导的倾斜侧壁角以及平板厚度分别固定为 1 μm、250 nm、67° 和 250 nm。我们对几何参数进行扫描，包括锥形段长度 L_T、多模干涉区长度 L_C以及多模干涉区顶部宽度 W_M，从而针对每种设计中的基模横电（TE_0）模式实现低损耗、低串扰的优化设计，[如图 1(c)]所示。对于非对称设计，这些参数分别针对0° 和90° 臂进行优化。

作为示例，图 2 展示了 1550 纳米处对称交叉结构的模拟插入损耗随不同L_C、 L_T和W_M 值的变化。红色星号表示最优插入损耗为 0.038 dB，此时的几何参数为W_M = 3.3 μm、L_C = 10.5 μm 和L_T = 7 μm。优化后的非对称交叉结构中，90° 臂的W_M、L_C和L_T 值分别为 3.4 μm、12.5 μm、7 μm；0° 臂的相应数值分别为 3.2 μm、10 μm、6 μm。随后，在商用 x 切绝缘体上铌酸锂晶圆（NANOLN）上制作器件。首先沉积一层 SiO_2。随后，使用 ASML 紫外步进式光刻系统（NFF，香港科技大学）将图案转移到 SiO_2 层上，再进行反应离子刻蚀（RIE）。接着，进行第二步 RIE，将图案转移到铌酸锂层上。最后，将芯片切割，以便进行端面耦合[15]。

接下来，我们通过表征所制造薄膜铌酸锂交叉结构的插入损耗，说明传统切回测量的局限性。图3(a)显示了采用宽带可调谐激光器（Santec TSL-550）测得的不同数量 45°路由交叉结构波导的归一化传输光谱；测量时，先通过偏振控制器发射 TE_0 模式，再使用透镜光纤实现高效耦合。输出光由另一根透镜光纤收集，最终传输至光电二极管（光电探测器）。随着交叉结构数量增加，测得的透射率逐渐下降，其变化趋势可通过线性回归拟合，以估算单个交叉结构的插入损耗。在这些光谱中可清楚观察到 Fabry–Pérot 干涉条纹，由此带来的测量不确定度（标准差）为 σ_s = 0.510 dB。图 3(b)显示了该器件的线性回归结果：在 1550 纳米处，拟合损耗为 0.022 dB，不确定度为 0.056 dB。总测量不确定度估算为 $\sigma_t = [(\sigma_s^2 + \sigma_c^2)/c_x]^{1/2}$，其中 σ_c = 0.368 dB 是由不同器件间的耦合和制备变化造成的标准差（红色误差棒），$= (x_i - \bar{x})^2 = 125$ 是每条切回波导的交叉结构数量（x_i）与平均数量（$\bar{x}$）之差的总和。我们通过以下方式校准 σ_c：测量同一芯片上四条参考波导（不含交叉结构）的透射率，计算方法为 $\sigma_c = (\Sigma(T_i - T)^2/4)^{1/2}$，其中 T_i 为每条参考波导的透射率，T 为平均透射率。值得注意的是，尽管测试了多达 20 个交叉结构、共 5 个独立器件，估算的测量不确定度 0.056 dB 仍远大于估算损耗本身（0.022 dB），这表明测量微小损耗存在显著局限性。采用相同方法，我们估算了图3(c)中两种设计沿三种布线晶体方向的插入损耗；[插图中的黑色箭头表示相对于光轴（红色虚线）的方向]，，拟合插入损耗和测量不确定度分别由蓝色虚线和阴影区域的宽度表示。

在 1550 纳米处，沿 45°、90° 和 0° 方向估算的插入损耗分别为 0.022 ± 0.056 dB、0.109 ± 0.055 dB 和 0.122 ± 0.064 dB，测量不确定度均较大，为 > 0.050 dB。

使用传统方法进行小串扰测量时也存在类似挑战。图3(a)中的底部灰色曲线显示了串扰光谱。测得的串扰值（~ -40 dB）显著高于仿真结果（~ -60 dB），这可能是由芯片上的缺陷和端面产生的散射噪声所致。当前测量系统的噪声底相对较高，为~ -45 dB，这也严重限制了测量能力；该噪声底可根据激光器的最大输出功率 13 dBm、光电探测器的噪声底 ~ - 50 dBm、每个端面的光纤-芯片耦合损耗 ~ 5 dB[15]，，以及光纤链路其他部分的几 dB 附加损耗进行估算。图3(d)总结了沿三个布线方向测得和仿真的串扰，所有方向上测得的串扰值均显著高于仿真值（> 15 dB）。

最后，我们采用所提出的谐振器辅助方法对所设计的波导交叉结构进行表征，结果显示插入损耗测量精度显著提高，串扰测量底限降低。图4(a)展示了在同一薄膜铌酸锂芯片上并排制备的、沿45° 布线方向的嵌入交叉结构的谐振器（亮蓝线）和参考谐振器（灰线）的归一化强度光谱示例。对图4(a)[右图] 进行洛伦兹拟合表明，由于交叉结构引入的过量损耗，嵌入交叉结构的谐振器的加载Q因数显著降低至226,000，而参考谐振器的加载品质因数为（~ 300,000）。我们可利用以下方程，根据加载Q因数提取谐振器的往返振幅透射系数a[16]:

$$a = 1 - \frac{\pi n_g L}{2\lambda Q_L} - \sqrt{\frac{1}{T_t}} + \sqrt{\left(\frac{\pi n_g L}{2\lambda Q_L}\right)^2 - \frac{\pi n_g L}{\lambda Q_L} + \frac{1}{T_t}}, \quad \textbf{(1)}$$

其中，n_g 和Q_L 分别为目标波长λ处的群折射率和加载品质因数，L为谐振器的周长。$T_t = I_t/I_i$ 为谐振相对透射率，其中I_i 和I_t 分别为非谐振和谐振光强。随后，我们可利用以下方程，通过比较嵌入交叉结构的谐振器（a_c^2）和参考谐振器（a_r^2）的往返强度透射率，估算交叉结构的插入损耗IL:

$$IL = 10\log_{10}\frac{a_c^{\,2}}{a_r^{\,2}}. \quad \textbf{(2)}$$

图4(b)显示了沿三个交叉方向进行洛伦兹拟合得到的加载Q因子。 Q因子的波动主要源于背景谐振条纹导致的洛伦兹线形畸变。尽管存在这些波动，我们的插入损耗测量不确定度仍远小于图3(c)中的截断法结果，见[图4(c)中的阴影区域] 。测量不确定度的计算方式为 （ ）$^{1/2}$，其中 是提取出的插入损耗的标准差，即[本例中图4(c)的蓝点], 对应的< 0.018 dB，而 是不同谐振器之间由制备变化导致的标准差。我们通过对同一芯片上多个参考谐振器的往返强度透射率进行统计分析来校准 ，其数值仅为~ 0.009 dB（切回法为0.368 dB）。重要的是，以上所有分析均不受光纤-芯片耦合变化的影响，因此只需两个器件即可将插入损耗测量不确定度控制在~ 0.02 dB。1550 纳米附近沿三个方向测得的插入损耗分别为0.051 ± 0.014 dB、0.065 ± 0.013 dB和0.070 ± 0.021 dB，表明测量不确定度有所降低（> 0截断法结果为0.055 dB），且与仿真结果吻合良好。

进行串扰测量时，我们监测嵌入交叉结构的谐振器交叉端口输出的光信号；该信号在每个谐振波长处均呈现一个谐振增强串扰峰I_{cr} [深蓝色线条见图4(a)] 。我们可以使用以下公式估算交叉结构的串扰:

$$Crosstalk = 10\log_{10}\frac{T_c}{M}, \quad \textbf{(3)}$$

其中，$T_c = I_{cr}/I_i$ 表示 共振时相对串扰透射率， M表示谐振器的强度放大因子：

$$M = \frac{1-t^2}{(1-a_c t)^2}. \quad \textbf{(4)}$$

t 是波导耦合器的振幅传输系数，可根据谐振器的加载Q因子估算：

$$t = 2 - a_c - \frac{\pi n_g L}{\lambda Q_c}. \quad \textbf{(5)}$$

图 4(d) 展示了提取出的三个布线晶体方向的串扰值，分别为 -50.1 ± 5.1 dB、-58.0 ± 5.1 dB 和 -56.2 ± 2.8 dB，与我们的理论预测符合得好得多。得益于谐振器提供的 ~15 dB 功率放大，我们将测得的最低串扰值从传统方法中的 ~ -45 dB 降至此处的 ~ -60 dB，从而能够更准确地测量实际串扰值。

总之，我们展示了薄膜铌酸锂中沿三个布线方向的两种基于MMI的波导交叉，在 1550 纳米下，所有器件的插入损耗均为 < 0.070 dB，串扰均为 < -50 dB。以低损耗、低串扰实现波导交叉的能力，可为未来大规模薄膜铌酸锂光子集成电路的布局设计提供灵活性。我们设计的波导交叉结构采用谐振器辅助方法进行表征，与传统截断法相比，该方法提高了

< . dB 的插

0 021

15

入损耗测量精度，并将串扰测量底限降低了 dB。通过改进制造工艺提高谐振器的Q因子，还可进一步降低插入损耗不确定度和最小可测串扰。所提出的谐振器辅助方法为测量超低损耗波导交叉结构提供了一种准确、高效的解决方案，也可应用于其他光子平台。

参考文献

1. Q. Cheng、M. Bahadori、M. Glick、S. Rumley 和 K. Bergman，“数据中心光学技术的最新进展：综述”，Optica **5**, 1354-1370 (2018)。2. W. D. Sacher、Y. Huang、G. Q. Lo 和 J. K. S. Poon，“多层硅上氮化硅集成光子平台与器件”，J. Lightwave Technol. **33**, 901-910 (2015)。3. G. Chen、K. Chen、J. Zhang、R. Gan、L. Qi、X. Fan、Z. Ruan、Z. Lin、J. Liu 和 C. Lu，“硅衬底上的紧凑型100 GBaud免驱动薄膜铌酸锂调制器”，Opt. Express **30**, 25308-25317 (2022)。4. J. M. Shainline、S. M. Buckley、R. P. Mirin 和 S. W. Nam，“用于神经形态计算的超导光电电路”，Phys. Rev. Appl. **7**, 034013 (2017)。5. J. Wang、F. Sciarrino、A. Laing 和 M. G. Thompson，“集成光子量子技术”，Nat. Photon. **14**, 273- 284 (2020)。6. T. Zhou 和 H. Jia，“用于片上光子网络的光开关拓扑优化方法”，《光学通信》 **413**, 230- 235 (2018)。7. D. Yi、W. Zhou、Y. J. Zhang 和 H. K. Tsang，“多频带和宽带波导交叉结构的逆向设计”，Opt. Lett. **46**, 884-887 (2021)。8. L. Han、X. K. Ruan、W. J. Tang 和 T. Chu，“利用反向锥形结构实现用于光子集成电路的超低损耗波导交叉结构”，Opt. Express **30**, 6738-6745 (2022)。9. S. L. Wu、S. M. Mao、L. D. Zhou、L. Liu、Y. J. Chen、X. Mu、L. R. Cheng、Z. M. Chen、X. Tu 和 H. Y. Fu，“基于亚波长光栅MMI耦合器的紧凑型偏振不敏感硅波导交叉”，Opt. Express **28**, 27268 27276 2020- ( )。10. M. Johnson、M. G. Thompson 和 D. Sahin，“面向可扩展集成硅光子学应用的低损耗、低串扰波导交叉结构”，Opt. Express **28**, 12498-12507 (2020)。11. H. J. Zuo、S. L. Yu、T. Gu 和 J. J. Hu，“低损耗、柔性单模聚合物光子学”，Opt. Express **27**, 11152- 11159 (2019)。

12. H. M. Yang、P. F. Zheng、G. H. Hu、R. H. Zhang、B. F. Yun 和 Y. P. Cui，“基于多模干涉的宽带、低串扰及低偏振相关氮化硅波导交叉结构”，《光学通信》 **450**, 28-33 (2019)。13. R. Gao、N. Yao、J. Guan、L. Deng、J. Lin、M. Wang、L. Qiao、W. Fang 和 Y. Cheng，“品质因数超过10 8的超高品质因数铌酸锂微环”，《中国光学快报》 **20**, 011902 (2022)。14. C. Wang、M. Zhang、X. Chen、M. Bertrand、A. Shams-Ansari、S. Chandrasekhar、P. Winzer 和 M. Lončar，“工作于CMOS兼容电压下的集成铌酸锂电光调制器”，《自然》 **562**, 101-104 (2018)。15. K. Zhang、W. Sun、Y. Chen、H. Feng、Y. Zhang、Z. Chen 和 C. Wang，“一种高能效集成铌酸锂电光梳状发生器”，arXiv预印本 arXiv:2208.09603 (2022)。16. W. Bogaerts、P. De Heyn、T. Van Vaerenbergh、K. De Vos、S. Kumar Selvaraja、T. Claes、P. Dumon、P. Bienstman、D. Van Thourhout 和 R. Baets，“硅微环谐振器”，《激光与光子学评论》 **6**, 47-73 (2012)。

致谢

This 本研究部分经费由研究资助局、大学教育资助委员会（香港城市大学 11204820 ，
CityU 11212721, N_香港城市大学113/20）；邵逸夫基金会（9509055）提供。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

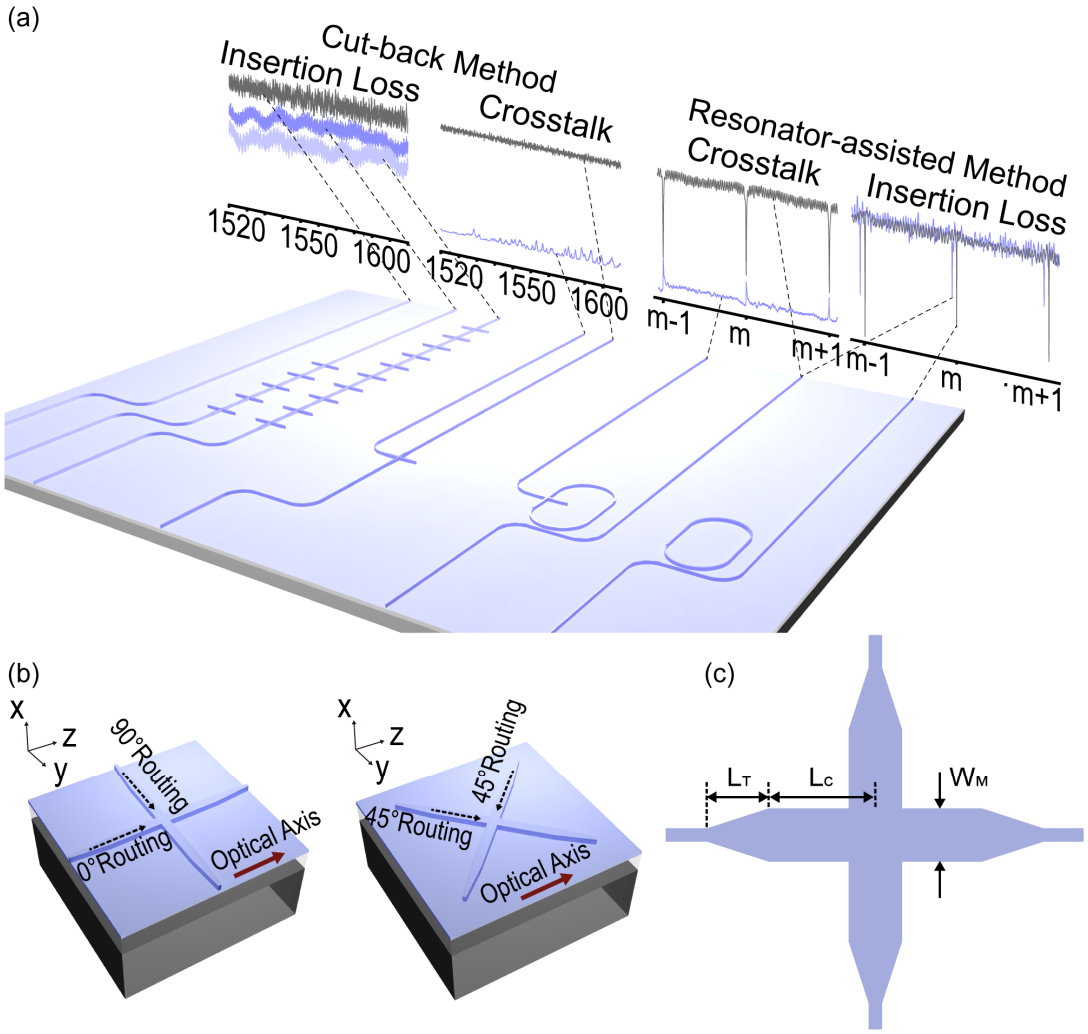


图1. (a) 用于插入损耗和串扰表征的切回法及谐振器辅助测量示意图。(b) 三种晶体布线路径方向的两种设计示意图。(c) 为获得最优设计而扫描的几何参数。

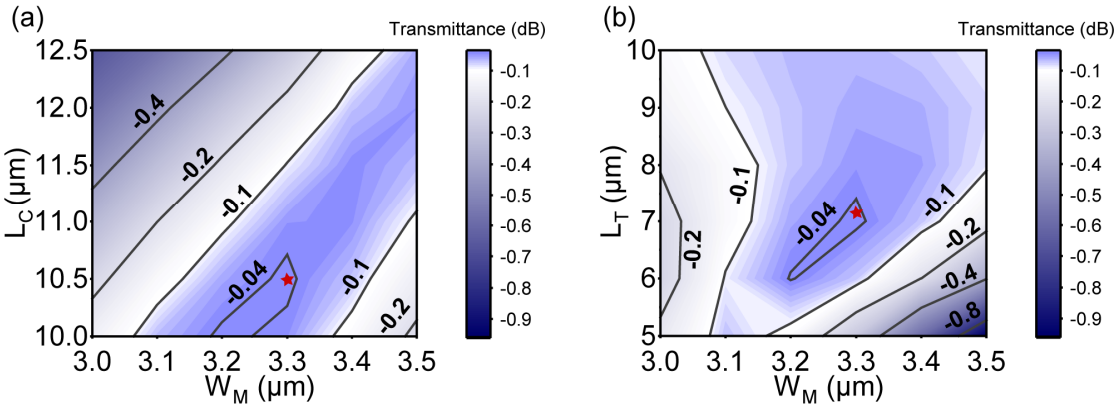


图 2。（a-b）沿45°布线晶向，插入损耗随（a）W_M、L_C 和（b）W_M、L_T 几何参数的变化关系。红色星号表示我们实验中采用的最优参数。

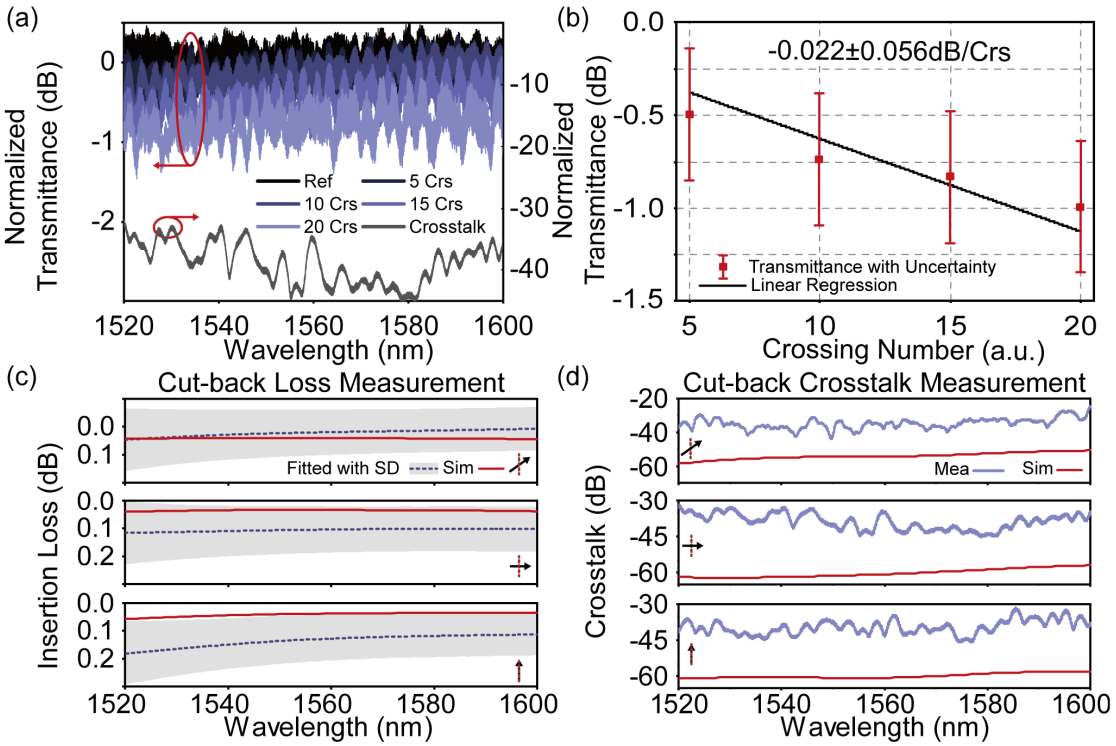


图 3. 使用传统方法对 TFLN 交叉结构进行表征。(a) 不同数量的级联45°路由波导交叉点的实测传输光谱（蓝线），以及单个波导交叉点交叉端口的透射率（底部灰线）。(b) 1550 纳米处插入损耗的线性回归。(c) 沿三个布线晶体方向（黑色箭头所示），拟合的插入损耗光谱（蓝色虚线）及其标准差（SD，阴影区域）与仿真预测值（红色）的对比。(d) 沿三个布线晶体方向，实测串扰光谱（蓝色）与仿真预测值（红色）的对比。

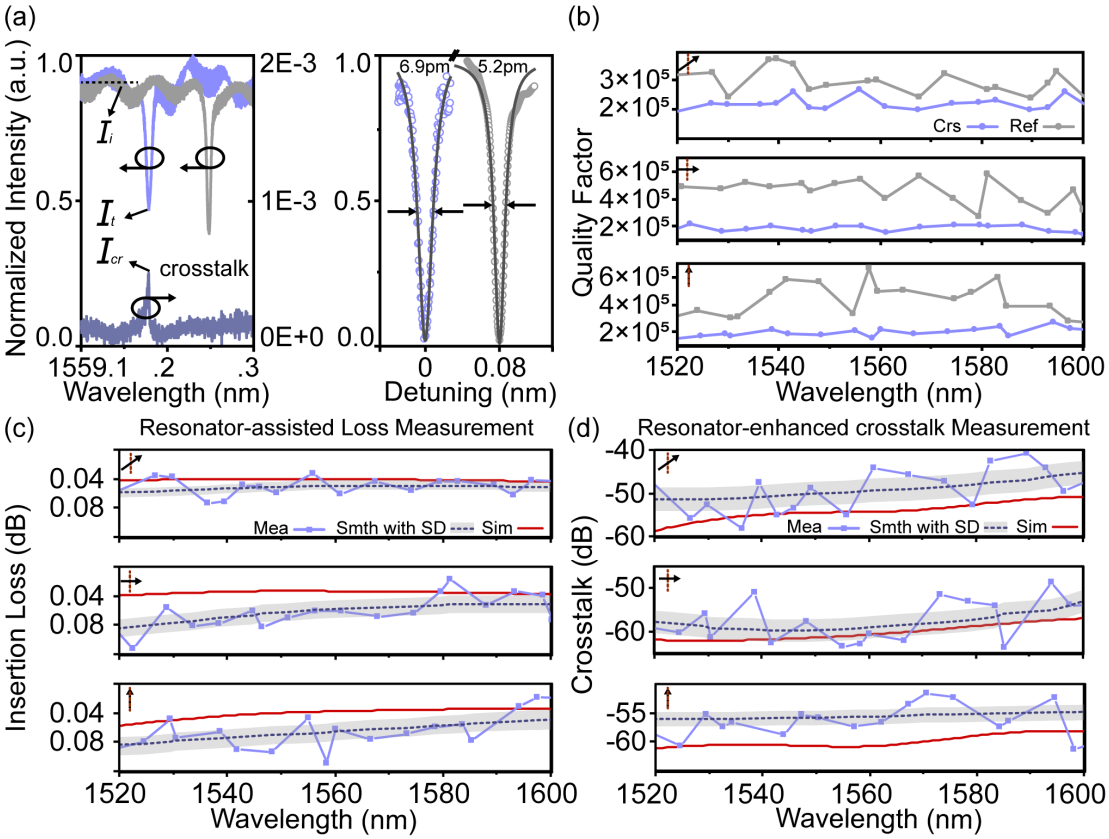


图 4。 TFLN 交叉结构的谐振器辅助表征。(a) 嵌入交叉结构的谐振器的直通端口（亮蓝色）和参考谐振器（灰色）的归一化传输光谱示例，以及交叉结构谐振器的交叉端口（深蓝色）的归一化传输光谱。右侧：共振峰的放大视图及洛伦兹拟合。(b) 沿三个布线晶体方向（黑色箭头），在不同波长处提取的参考谐振器（灰色）和嵌入交叉结构的谐振器（蓝色）的加载 Q 因子。(c-d) 在不同波长处提取的原始插入损耗（蓝点）、平滑后的插入损耗（蓝色虚线）和模拟插入损耗 (c)，以及串扰 (d)。阴影区域表示测量结果的标准差。