|  |
| --- |
|  |
| 技术开发总结报告 |
| 项目名称：硅光统计模型的开发与验证  技术团队： Luceda NV.  项目经理： Pieter Dumon  2025 年 7月 24日 |

目录

[目录 1](#_Toc204619467)

[1. 项目背景 1](#_Toc204619468)

[2. 技术开发目标与技术方案 2](#_Toc204619469)

[2-1. 技术开发目标 2](#_Toc204619470)

[2-2. 技术路线 2](#_Toc204619471)

[2-3. 关键技术与工具 3](#_Toc204619472)

[3. 开发过程 3](#_Toc204619473)

[3-1. 项目第二阶段规划： 3](#_Toc204619474)

[3-2. 项目人员安排（LUCEDA 方） 4](#_Toc204619475)

[4. 成果与性能评估 5](#_Toc204619476)

[5. 总结 11](#_Toc204619477)

# 1. 项目背景

硅光器件统计学模型的开发源于硅光技术在高性能通信、数据中心、传感和量子计算等领域中的广泛应用需求。作为一项能够集成光学和电子器件的技术，硅光凭借与CMOS工艺的兼容性，显著降低了制造成本，并促进了大规模光电集成。然而，硅光器件的性能往往受制于制造过程中不可避免的工艺波动和材料特性的不确定性，如薄膜厚度、刻蚀深度、掺杂浓度、折射率变化等。这些微观层面的工艺参数偏差会引发器件性能（如谐振波长、调制效率、波导损耗等）在实际应用中的显著波动，进而影响系统的稳定性和可靠性。

由于这些制造不确定性是不可完全消除的，必须依靠统计学模型来进行性能的量化分析和预测。统计学模型能够有效地描述工艺参数的随机波动，并为设计提供精确的性能分布预测。这不仅能够帮助工程师在设计阶段识别和应对工艺变化带来的影响，还能够引导对器件进行容差设计，使其在存在制造偏差的情况下仍能维持优良的性能表现。此外，统计模型为硅光器件的优化设计提供了基础，通过多变量的联合分析与仿真，有助于在多个设计参数之间找到最佳的平衡点，提升器件整体的性能、良率与可制造性。因此，硅光器件统计学模型的开发对于推进硅光技术的可靠性设计、制造一致性和大规模商用化应用具有不可或缺的重要意义。

Luceda Photonics 在硅光统计学建模领域拥有深厚的技术积累，其核心产品 IPKISS 设计平台已经成为业界领先的硅光器件设计、仿真和优化工具。通过将先进的物理模型与统计学分析相结合，Luceda 为硅光器件的设计和制造提供了强有力的支持。该平台能够精确模拟制造过程中不可避免的工艺波动，量化这些不确定性对器件性能的影响，并通过统计建模手段实现性能预测和容差分析。此外，Luceda 的技术积累还体现在多变量优化和自动化设计流程中，用户可以在多维度设计空间内找到最优方案，从而提高器件的稳定性和制造良率。这种全面的统计学建模能力使 Luceda 能够帮助企业在硅光技术的复杂设计和制造流程中保持领先地位。

# 2. 技术开发目标与技术方案

## 2-1. 技术开发目标

基于CUMEC提供的PDK及测试数据，LUCEDA根据CUMEC要求完成硅光统计模型的开发与验证，建立基于CUMEC工艺平台实际工艺能力的硅光器件统计模型库，支撑CUMEC完成工艺线良率提升至80%的目标。

## 2-2. 技术路线

硅光统计学模型开发路线包含从最初模型参数确定到将统计学模型集成到PDK中全流程。具体过程如下：

1、确定模型参数，硅光器件的模型参数主要用于描述其物理行为、光学性能、材料特性及制造工艺的相关因素。统计学模型的构建基于这些参数，因此开发的首要任务是明确并定义这些关键参数。

2、设计测试线路，在确定模型参数后，需要设计专门的测试线路，以提取这些参数及其分布情况

3、收集测试数据，基于设计的测试线路可以筹集**工艺波动数据和器件测试数据**

**工艺波动数据，**收集实际生产过程中关键工艺参数的波动范围和分布，例如波导蚀刻宽度等。

**器件测试数据，**收集不同工艺条件下的器件性能数据，例如波导损耗、功率不平衡等。

4、处理测试数据

**数据分类，**过滤掉异常数据和噪声，确保数据集的质量。

**归一化处理，**将不同单位和尺度的数据进行标准化处理，以便后续建模和分析。

5、统计建模

**选择模型类型**：根据收集到的数据，选择适合的统计学模型（例如高斯混合模型）来描述工艺参数和器件性能之间的关系。

6、模型精度分析

参数化模型构建，基于前期的统计分析，构建器件性能的参数化模型。这一模型能够根据不同的工艺波动情况，输出相应的器件性能指标。

**模型验证，**通过对比模型预测结果和实际测试数据，验证模型的准确性。

7、模型集成到PDK中

**接口开发，**开发与现有PDK兼容的接口，确保设计者可以在设计流程中直接调用该统计学模型。

**流程优化，**将统计学模型与现有设计流程整合，确保设计者能够在早期阶段预测器件性能波动，优化设计。

## 2-3. 关键技术与工具

数据分析工具：Python

EDA工具：LUCEDA IPKISS、Lumerical

统计学方法：高斯混合模型、蒙特卡洛仿真等。

# 3. 开发过程

## 3-1. 项目第二阶段规划：

项目的第二阶段开发按照既定的时间表有序推进，各个里程碑目标清晰明确，涵盖了从规划到测试数据分析的整个过程。具体时间规划如下：

2024年9月前提交项目规划书：项目团队首先制定并提交了详细的项目规划书，内容涵盖项目的总体目标、技术路线、时间安排以及资源分配等内容，为项目的实施奠定了坚实基础。

2024年12月前提交芯片设计版图：第二个重要里程碑是在2024年年底前完成芯片的设计版图提交。设计版图不仅涵盖了光学器件的布局，还包括工艺参数的优化，以确保后续生产流程的顺利进行。

2025年3月前获取芯片测试数据：在芯片制造完成后，团队将获取初步的测试数据，这些数据将用于验证设计的正确性，并为后续的建模工作提供必要的基础数据。

2025年7月前完成测试数据处理与统计学建模，提交项目第二阶段报告：在第二阶段的最后，团队将完成测试数据的处理与统计学建模，并基于此生成分析报告，提供各项性能指标的评估，形成对器件模型的深入理解，并提交项目第二阶段的总结报告。

## 3-2. 项目人员安排（LUCEDA 方）

项目团队由多个领域的专家组成，合理分工确保了项目的各个环节能够有效实施。人员安排如下：

芯片设计：Pieter 和李彪负责测试线路的设计。

数据处理：数据处理的工作由Pieter、邓宏和李彪共同负责。他们将对从芯片测试中收集的原始数据进行整理、处理，确保数据的准确性和完整性，为后续的建模提供高质量的数据支持。

模型搭建：模型的构建由Pieter、邓宏、Dennis 和李彪共同完成。这一阶段的工作集中在将处理后的数据转化为可用的统计学模型，尤其是建立基于高斯混合模型的器件性能分析框架，以提升模型的精度和适用性。

报告撰写：项目报告的撰写由Pieter、邓宏、苏宁和李彪负责。这些成员将整理和分析建模成果，撰写详细的技术报告，提供项目的阶段性总结和后续优化建议。

# 4. 成果与性能评估

在项目第二阶段，建模工作已按计划顺利完成，整体建模精度达到了95%以上，达成预期的精度指标要求。具体成果和模型性能如下：

表 1项目第二阶段建模成果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Components** | **Model Parameter** | **Performance** | **Modeling**  **accuracy** |
| Waveguide | neff and ng | Strip 0.45um@C:  2.32 0.04/4.2930.004 | 99.7% |
| Rib 0.7um@C: 2.4450.05/3.6220.006 | 99.53% |
| ModRib 0.65um@C: 2.0.0034/3.79170.0049 | 97.7% |
| Propagation loss | Strip：[1.360.09dB/cm @C](mailto:1.360.09dB/cm@C) | 97.3% |
| Strip：2.94 dB/cm@O | 97.86% |
| Rib：0.150.04dB/cm@C |  |
| Rib：0.220.01dB/cm@O |  |
| ModRib：0.760.05dB/cm@C |  |
| ModRib：1.670.13dB/cm@O |  |
| Bend loss | Strip: 0.00517dB @C | 99.67% |
| Strip: 0.003160.00015dB @O | 96.27% |
| Rib：0.03324± 0.00317 dB@C |  |
| Rib: 0.003195 ± 0.00317 dB@O |  |
| ModRib：0.00779± 0.00222 dB@C |  |
| ModRib：0.00318 ± 0.00232 dB @O |  |
| Grating coupler | Insertion loss | TE: 4.49 ± 0.13 dB @C | 97.8% |
| TE: 4.30 ± 0.45 dB @O | 95.6% |
| TM: 6.29 ± 0.18 dB@C | 98.8% |
| TM: 7.30 ± 0.56 dB dB@O | 96.7% |
| Center Wavelength | TE: 1553.78 ± 3.10 nm @C | 99.91% |
| TE: 1303.59 ± 3.77 nm @O | 98.91% |
| TM: 1555.35 ± 2.14 nm @C | 99.51% |
| TM：1324.60 ± 4.15 nm@O | 96.46% |
| 1dB BandWidth | TE: 25.22 ± 0.50 nm@C | 96.46% |
| TE: 20.91 ± 2.53 nm@O | 96.46% |
| TM: 24.23 ± 1.11 nm@C | 96.46% |
| TM: 18.78 ± 0.85 nm@O | 96.46% |
| Edge coupler | Insertion loss | 2.320.79dB/@C | 96.46% |
| 2.950.864dB @O | 97.63% |
| Transition | Insertion loss | SR: 0.0415 ± 0.0031 dB @C | 99.96% |
| SR: 0.0903 ± 0.0063 dB @O | 95.24% |
| SM: 0.0415 ± 0.0020 dB @C | 97.8% |
| SM: 0.0903 ± 0.0063 dB @O | 97.22% |
| MMI（1x2;2x2） | Power imbalance | MMI1x2: 0.12 ± 0.02 dB @C | 99.79% |
| MMI1x2: 0.05 ± 0.042 dB @O | 99.75% |
| MMI2x2: 0.11 ± 0.02 dB @C | 99.79% |
| MMI2x2: 0.34± 0.06 dB dB @O | 99.56% |
| Directional Coupler | Coupling coefficient | Kl=0.1835λ+0.013; Kb=0.1603λ+0.0181@C | 98.77% |
| Kl=0.143λ+0.0996; Kb=0.136λ+0.106@O | 99.22% |
| Ring Resonator | FSR(10um/20um/50um) | 8.29 ± 0.71 nm;  4.3 ± 0.1 nm;  1.73 ± 0.02 nm; @C | 97.9% |
| 5.76 ± 0.25 nm;  3.01 ± 0.02 nm;  1.19 ± 0.01 nm; @C | 96.4% |
| Waveguide Crossing | Insertion loss | 0.0337 ±0.0097 dB @C | 97.3% |
| 0.0813 ±0.0194 dB @O | 95.53% |
| Crosstalk | 32.38 ±3.78 dB @C | 99.96% |
| 45.19 ±3.2 dB @O | 99.66% |
| Thermal PhaseShifter | Modulation Efficiency | 1.7865w+17.0706 | 98.3% |
|  | 99.97% |
| Resistivity |  | 99.8% |
| Self-heating Coefficient | 2503.8x-1.484 | 99.94% |
| RingModulator | Coupling Coefficient | 0.9507±0.0001 @C  0.9582±0.0076 @O | [99.4%@C](mailto:99.4%25@C)  98.5%@O |
| Loss Coefficient | 0.9564±0.0002 @C  0.9668±0.0006 @O |
| Effective index | 2.0009±0.0002 @C  2.0024±0.0003 @O |
| PN PhaseShifter | Loss | 13.49L-1.08LV | 98.2% |
| BandWidth | 34 GHz | 96.5% |
| PhotoDetector | Dark current | 31 nA | 99.99% |
| Responsivity | 0.597A/W |
| Band Width | 62 GHz |

1）Grating Coupler

完成了光栅耦合器（Grating Coupler）的建模工作。C波段Grating Coupler的插损和反射约为4.7 dB和19.8 dB。整体拟合精度达到了99.8%，统计学建模精度达到了97.8%，超出了预定目标，充分满足应用需求。O波段Grating Coupler的插损和反射约为4.95 dB。整体拟合精度达到了99.57%，统计学建模精度达到了95.6%，超出了预定目标，充分满足应用需求

2）WaveGuide

完成了条波导和脊波导的建模工作。0.45微米宽的条波导的有效折射率和群折射率为2.32和4.293，0.7微米宽的脊波导的有效折射率和群折射率为2.445和3.622。整体拟合精度分别为99.7%和99.53%。C波段条波导的传输损耗约为-1.399 dB/cm，整体拟合精度达到了98.4%，统计学建模精度达到了97.3%。C波段条波导的弯曲损耗约为0.0094 dB/900，对应的弯曲半径为10 微米，整体拟合精度达到了98%，统计学建模精度达到了99.26%。O波段条波导的传输损耗约为-3.113 dB/cm，整体拟合精度达到了98.4%，统计学建模精度达到了97.86%。O波段条波导的弯曲损耗约为0.0035 dB/900，对应的弯曲半径为10 微米，整体拟合精度达到了99.32%，统计学建模精度达到了96.27%。

3）Edge coupler

完成了Edge coupler建模工作。C波段和O波段的Edge coupler的插损约为2.32 dB和2.95 dB，整体拟合精度分别为96.46%和97.63%。

4）Crossing

完成了光学Crossing的建模。Crossing在集成光路中是一个关键的结构，其优化对减少光路中的插入损耗至关重要。 C波段Crossing的损耗为-1.339， 拟合精度为99.2%，其统计学建模精度达到了98.99%， O波段Crossing的损耗为-0.246， 拟合精度为99.63%，其统计学建模精度达到了96.57%，确保了模型能够准确预测Crossing的损耗与性能表现。

5）Transition

完成了Transition的建模，模型涵盖了从不同类型波导之间的过渡特性，C波段条波导到脊的Transition的插损约为0.009 dB，条波导到Mod\_Rib型波导的Transtion的插损约0.00495 dB。O波段条波导到脊的Transition的插损约为0.0172 dB，条波导到Mod\_Rib型波导的Transtion的插损约0.0157 dB。经过评估，Transition模型的精度也达到了95.1%以上。

6）MMI

完成了MMI的建模，C波段MMI1x2的反射率约为-10.67 ±0.62 dB，整体拟和精度为95.51%；C波段MMI1x2的插入损耗约为 -2.78±0.095 dB，整体拟合精度为99.79%； C波段MMI2x2的插入损耗约为 -2.55±0.099 dB，整体拟合精度为99.73%。O波段MMI1x2的反射率约为-15.5 ±1.28 dB，整体拟和精度为95.58%；O波段MMI1x2的插入损耗约为 -2.826±0.048 dB，整体拟合精度为99.79%； O波段MMI2x2的插入损耗约为 -2.55±0.0459 dB，整体拟合精度为99.56%。

7）Directional Coupler

完成了Directional Coupler的建模，C波段Directional Coupler的耦合系数为：

 （1）

整体拟合精度为98.77%

O波段Directional Coupler的耦合系数为：



整体拟合精度为99.22%。

8）Ring Resonator

完成了Ring Resonator的部分建模，C波段半径为10um、20um以及50um的微环对应的FSR分别为：8.928± 0.002; 4.458 ± 0.0097; 1.787 ± 0.011，整体拟合精度为97.9%，由于微环其他参数，如Q值无法提取，因此无统计学建模精度。

9）Thermal Phase Shifter

完成了Thermal Phase Shifter的建模，Thermal Phase Shifter调制效率与加热器长度以及加热器和波导间距之间的关系为： 以及。

建模精度为99.97%和99.8%。Thermal Phase Shifter的电阻率和自发热系数为： 和2503.8x-1.484建模精度为99.8%和99.94%。

10）RingModulator

完成了微环调制器的建模，C波段微环调制器的耦合器系数、损耗系数以及有效折射率的均值分别为0.9507、0.9564以及2.009，O波段微环调制器的耦合器系数、损耗系数以及有效折射率的均值分别为0.9582、0.9668以及2.0024。C波段微环调制器建模精度为99.4%。O波段微环调制器建模精度为98.5%。

11）PhotoDetector

完成了PhotoDetector的建模，PhotoDetector的暗电流、响应度以及带宽分别为：31 nA、0.597A/W以及62GHz，整体建模精度为达到99.99%

# 5. 总结

本项目致力于硅光器件的统计学模型开发与验证，顺利完成了第一阶段的预期任务，为硅光技术在高性能通信、数据中心、传感和量子计算等应用中的推广提供了坚实的技术支撑。通过对核心器件如光栅耦合器、波导、交叉结构、过渡结构等进行精确建模，项目实现了95%以上的建模精度，显著提升了硅光器件的性能预测能力和制造一致性。

项目的技术路线基于高斯混合模型、蒙特卡洛仿真等统计方法，结合了从工艺波动数据到器件性能建模的全流程处理。得益于LUCEDA IPKISS等先进EDA工具的应用，项目团队成功构建了具备高可靠性和可扩展性的器件性能模型，并将这些模型有效集成到了工艺设计套件（PDK）中，实现了硅光器件性能的全面分析与优化。模型的成功开发使得工程师能够更好地应对制造工艺中的不确定性，通过模型进行参数优化与设计容差分析，从而提高器件的良率。

然而，尽管取得了显著进展，项目在测试线路设计和模型参数提取方法上依然存在改进的空间。测试线路设计中的一些局限性导致部分器件的损耗分离精度不足，如MMI和定向耦合器的测试线路使用了相同的输入光栅，影响了损耗的独立提取。脊波导的弯曲损耗提取线路设计中，过小的弯曲半径导致了光学损耗的过度增加，从而无法准确提取波导的实际损耗数据。此外，微环谐振器耦合区域的设计过长，导致了光谱耦合深度的不足，影响了测试精度。这些问题的出现为后续的优化设计提供了宝贵的经验。

在模型参数提取方面，项目引入了更为复杂的震荡模型来优化MMI反射率的提取，未来还将结合机器学习技术，自动从多个级联结构中提取单个器件的性能模型。这些改进措施有望进一步提升模型的准确性和鲁棒性，为硅光器件的更高精度建模提供新的思路。

未来的优化方向主要集中在测试线路设计和模型提取方法的提升。项目团队计划通过将MMI和DC的测试线路调整为Splitter Tree结构、更合理的弯曲半径设计、引入Dummy光栅对以减少工艺误差等手段，来提高测试数据的精度和一致性。此外，利用机器学习和复杂震荡模型，进一步提升器件性能参数的提取精度和模型表达能力。通过这些改进，项目不仅能够解决现有测试设计中的损耗分离问题，还能够更全面地反映器件的真实物理特性。

总的来说，本项目在硅光器件的统计学建模领域取得了重要突破，成功建立了高精度的器件性能模型，并为未来硅光技术在大规模光电集成中的应用奠定了坚实基础。随着测试线路和建模方法的进一步优化，项目将有望在后续开发阶段实现更高的设计精度和更强的模型推广性，为硅光技术的产业化应用做出更大贡献。