光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022092002

200 Gbit/s PAM4 光发射组件封装技术研究

周本军*，胡　伟，胡俊豪

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对 200 Gbit/s PAM4 光收发模块的设计需求，提出了一种基于四阶脉冲幅度调制（PAM4）、数据传输速率达 200 Gbit/s 的光发射组件封装方案。该封装内部集成了 4 路 PAM4 电/光转换通道，单通道数据传输速率为 50 Gbit/s。介绍了该 200 Gbit/s PAM4 光发射组件的组成和技术难点，然后对其中的 50 Gbit/s 数据传输通道进行了建模、仿真和优化，最后完成了样品的测试。测试结果表明：样品的单通道 PAM4 数据速率可达 50 Gbit/s，整体 PAM4 数据速率可达 200 Gbit/s，满足光收发模块的设计需求。

关键词： 200 Gbit/s；PAM4；光发射组件；光收发模块

中图分类号： TN303　**文章编号：** 1001－5868(2023)01－0049－04

Research on 200 Gbit/s PAM4 Optical Transmitter Packaging Technology

ZHOU Benjun，HU Wei，HU Junhao

（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： A package solution based on fourth-order pulse amplitude modulation（PAM4）optical transmitting components is proposed，whose data transmission rate can reach 200 Gbit/s，to meet the design requirements of 200 Gbit/s PAM4 optical transceiver modules. The package solution integrated four PAM4 electrical/optical conversion channels，and the data transmission rate of each single channel was 50 Gbit/s. Based on the packaging solution of optical transmitting components，firstly，the components and technical difficulties of 200 Gbit/s PAM4 optical transmitting components were introduced. Then，according to the technical difficulties，the 50 Gbit/s data transmission channel was modeled，simulated and optimized. Finally，the test of the sample was completed. The test results show that for this solution，the data rate of a single PAM4 channel can reach 50 Gbit/s，and the overall data rate of the PMA4 channels can reach 200 Gbit/s，which can fully meet the design requirements of optical transceiver modules.

Key words： 200 Gbit/s；PAM4；TOSA；optical transceiver module

0　引言

在光收发模块设计中，传统的 NRZ 采用“0”、“1”编码，每个电平代表 1 bit 数据信息。PAM4 采用脉冲幅度调制，使用“00”、“01”、“10”和“11”的方式编码，每个电平代表 2 bit 数据信息。因此，在相同波特率情况下，PAM4 编码格式传输的数据信息 bit 数为传统 NRZ 编码格式的 2 倍，具有双倍信道容量优势。

PAM4 光收发模块基于 PAM 编码格式的信道容量优势而设计[1]，相对于传统的光收发模块，PAM4 光收发模块使用 4 个不同的脉冲幅度来传达数据信息，每个幅度由 2 bit 数据信息组成，其数据信息的传输速率为传统光收发模块的 2 倍，具有更高的带宽效率，可以满足短距离链路对光模块的需求。现阶段，商用的 PAM4 光收发模块中使用的光发射组件由分立器件组成，集成度低、应用领域狭窄[2]。

收稿日期：2022－09－20.

*通信作者：周本军　E-mail：860232889@qq.com

本文提出了一种 200 Gbit/s PAM4 光发射组件封装设计，研制出满足 200 Gbit/s PAM4 光收发模块设计需求的 PAM4 光发射组件，旨在降低 PAM4 光收发模块的设计难度，提高 PAM4 光收发模块的集成度，减小 PAM4 光收发模块的体积，以满足更宽、更 s 广领域的应用。本文研制的光发射组件具备 4 路电/光转换通道，每路电/光转换通道的数据信息传输速率达到 50 Gbit/s，整体数据信息传输速率为 200 Gbit/s，输出光功率大于等于 5 dBm，消光比大于等于 4 dB，发射机色散眼图闭合代价(TDECQ)小于等于 2.5 dB，线性度大于等于 0.8，光发射组件的体积小于等于 12.1 mm×7.6 mm×3.1 mm。

1 封装方案

本文设计的 200 Gbit/s PAM4 光发射组件的封装结构如图 1 所示，由外部柔性电路板(FPC)、HTCC 陶瓷走线板(BOX)、电光转换单元(COC)、光纤耦合单元(FCA)及金属管壳构成。其中，COC 包括 4 路激光器驱动器、4 路 1 550 nm DML 激光器、氮化铝金属基板及电阻电容，FCA 包含 4 路单模光纤、光纤固定卡槽。

200 Gbit/s PAM4 光发射组件的整体尺寸为 12 mm×7.5 mm×3 mm，内部 HTCC 陶瓷走线板(BOX)与 4 路激光器驱动器间、4 路激光器驱动器与 4 路 1 550 nm DML 激光器间采用金丝互连，外部通过 HTCC 陶瓷走线板的对外电气引脚与外部柔性电路板相连，以实现与外部电路的信号交互。

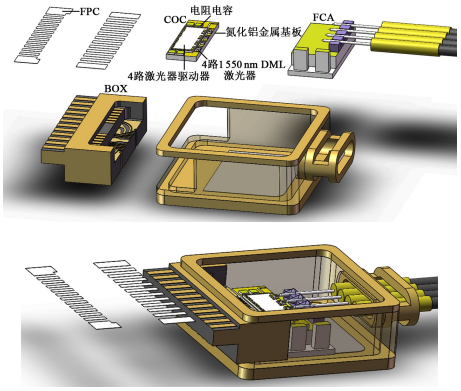


图 1 200 Gbit/s PAM4 光发射组件封装结构

200 Gbit/s PAM4 光发射组件包括 4 路电/光转换通道，需要将输入的 50 Gbit/s 的高速数字电信号转换成 50 Gbit/s 的高速数字光信号，并通过 4 路单模光纤输出。在使用时，需要将光发射组件焊接到外部光模块电路板上，通过外部柔性电路板输入 50 Gbit/s 的高速数字电信号，然后经 HTCC 陶瓷走线板完成高速数字电信号的陶瓷穿墙，接着输入到 4 路激光器驱动器中，再由 4 路激光器驱动器驱动 4 路 1 550 nm DML 激光器发光，实现电/光转换，最后通过耦合由 4 路单模光纤输出 4 路 50 Gbit/s 的高速数字光信号，完成 200 Gbit/s 高速数字信号的传输。因此，根据数字信号的传输、转换链路，需要完成以下几方面研究：

(1)200 Gbit/s 传输链路信号完整性(SI)设计：FPC→BOX→COC；

(2)内部互连金丝寄生参数优化；

(3)4 路单模光纤耦合单元耦合效率优化。

2 电路设计

2.1 信号完整性(SI)设计

200 Gbit/s PAM4 光发射组件高速数字信号的传输链路为：FPC→BOX→COC。因此，传输链路的信号完整性分析也即 FPC(外部柔性电路板)，BOX(HTCC 陶瓷走线板)，COC(电光转换单元)的信号完整性(SI)分析，该部分设计使用 HFSS 进行建模、仿真。在实际的设计中，分别建立 FPC，BOX 及 COC 的仿真模型；为了保证仿真结果的可靠性，根据实际的使用情况增加了外部光模块 PCB 的仿真模型，进行 PCB+FPC+BOX+COC 联动仿真。

组件电路仿真模型如图 2 所示。PCB，FPC 模型参考自身电源地，模型阻抗为差分 100 Ω；BOX，COC 模型参考 PCB 板的 PCB 板的电源地层，BOX 的模型阻抗为差分 98 Ω，COC 的模型阻抗为单端 25 Ω，保持与实际的使用一致。

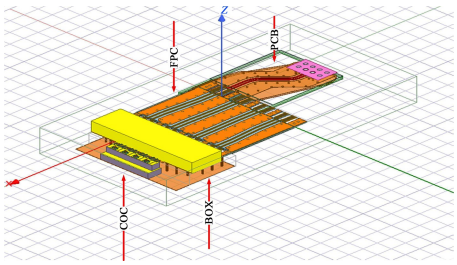


图 2 200 Gbit/s PAM4 光发射组件仿真模型

由于 4 路 50 Gbit/s 的高速数字仿真过程相同，在此截取了其中一条传输链路进行模拟带宽、PAM4 眼图仿真，仿真结果如图 3、图 4 所示。

图 3 所示仿真结果表明，设计的 200 Gbit/s PAM4 光发射组件带宽大于 25 G，按照 PAM4 的编

码格式，数据信息的传输速率大于 50 Gbit/s。

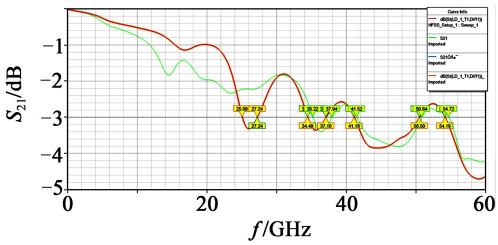


图 3　200 Gbit/s PAM4 光发射组件模拟带宽仿真

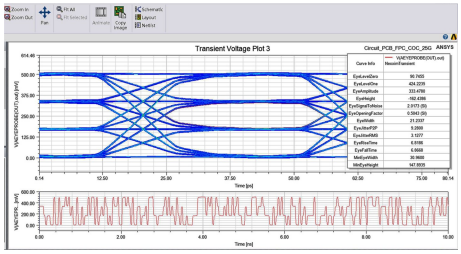


图 4　200 Gbit/s PAM4 光发射组件眼图仿真

图 4 为光发射组件的 PAM4 眼图仿真结果(输入信号：50 Gbit/s PAM4 数字信号@PRBS2^{31}-1。)，光眼图的形状好、抖动小，满足需求。

综合图 3、图 4 仿真结果，200 Gbit/s 光发射组件封装集成方案的模拟带宽大于 25 G，PAM4 数字信号传输速率大于 50 Gbit/s，PAM4 眼图参数好，仿真结果可以达到 200 Gbit/s PAM4 光收发模块的使用需求。

2.2　互连金丝寄生参数优化

200 Gbit/s 的光发射组件封装方案，HTCC 陶瓷走线板与 4 路激光器驱动器间、4 路激光器驱动器与 4 路 1 550 nm DML 激光器间使用金丝互连(金丝键合)，所使用金丝粗细(直径 d)不同、长短(长度 l)不同会带来不一样的寄生参数，将直接影响器件的数据传输速率。为此，在设计中对互连金丝的寄生参数进行了优化。

互连金丝的等效电路如图 5 所示[3]。

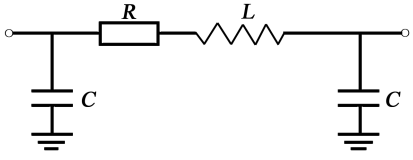


图 5　互连金丝等效电路图

在图 5 所示等效模型中，互连金丝的寄生电感由金丝长 l 和直径 d 决定，可表示为

$$L=\left(\frac{\mu_0 l}{2\pi}\right)\cdot\left[\ln\left(\frac{4l}{d}\right)+\mu_r\tan\left(\frac{4l}{d}\right)/4-1\right] \quad (1)$$

寄生电容可表示为

$$C=\varepsilon_r\varepsilon_0(A/h_0) \quad (2)$$

当互连金丝直径 d 和趋肤深度 d_s 的比值 $d/d_s<3.394$ 时，有

$$R=4\rho L/\pi d^2\cdot\cos[0.041(d/d_s)^2] \quad (3)$$

当比值 $d/d_s>3.394$ 时，有

$$R=4\rho l/\pi d^2\cdot(0.025d/d_s+0.026\,54) \quad (4)$$

式中，μ_0 和 ε_0 分别为自由空间的磁导率、电导率，μ_r、ε_r 和 ρ 分别表示互连金丝的相对磁导率、相对电导率及电阻率，A 表示金丝焊盘的面积，h_0 为介质基板厚度。

对于 50 Gbit/s 高速数字信号的传输，互连金丝处阻抗不连续会造成信号反射、衰减、延迟、谐振。由于趋肤深度与频率的平方根成反比[4]，结合式(1)～(4)，综合考虑指标要求、实际使用，得到互连金丝的优化参数为：$d=25$ μm，$l=0.35$ mm，$L=0.23$ nH。由于寄生电容、寄生电阻较小，可忽略。

3　光路设计

光纤耦合单元的结构如图 6 所示，其在氮化铝金属基板上集成了 4 路激光器驱动器、4 路 1 550 nm DML 激光器、4 路单模锥形光纤以及光纤固定卡槽等部件。光纤耦合过程是在 4 路 1 550 nm DML 激光器发光的条件下，使用光纤夹钳夹住 4 路单模锥形光纤，逐渐靠近 4 路 1 550 nm DML 激光器，通过左右、前后、上下移动使 4 路单模锥形光纤输出光的光功率达到最大，此时使用固定胶绑定 4 路单模锥形光纤在光纤固定卡槽上以完成耦合。

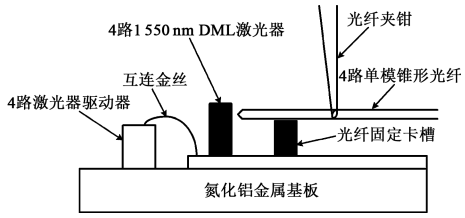


图 6　光纤耦合单元结构图

200 Gbit/s PAM4 光发射组件的输光功率由 4 路 1 550 nm DML 激光器的发光功率及光纤耦合组件的耦合效率决定。组件输出光功率需大于等于 5 dBm(约 3.16 mW)，而我们选用的 DML 激光器的输出光功率为 6.6 mW@80 mA 偏置电流，设计中保留 20%的裕量，则耦合效率 η 需达到 60%。

针对本文 200 Gbit/s PAM4 光发射组件，影响光纤耦合组件耦合效率的因素主要有贴片偏移和旋转角度。为此，我们使用 Zemax 软件对光路进行了

模拟，分析贴片偏移和倾斜角度对耦合效率的影响。

贴片偏移对耦合效率的影响如图 7 所示，仿真结果表明：需将贴片位置偏移 Δx 控制在 ± 20 μm 以内。倾斜角度 θ 对耦合效率的影响如图 8 所示，仿真结果表明：需将倾斜角度控制在 $\pm 2°$ 以内。

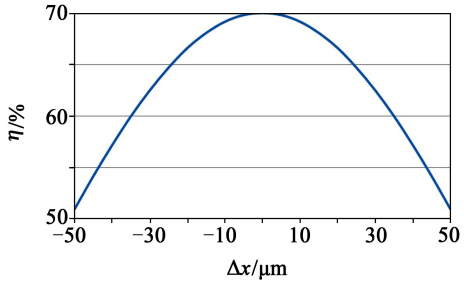


图 7 贴片偏移对耦合效率的影响

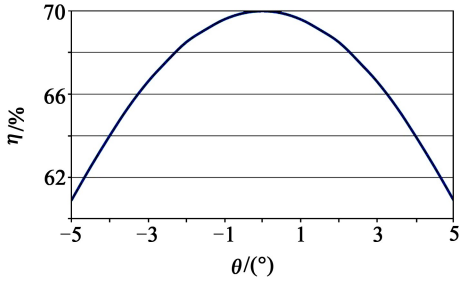
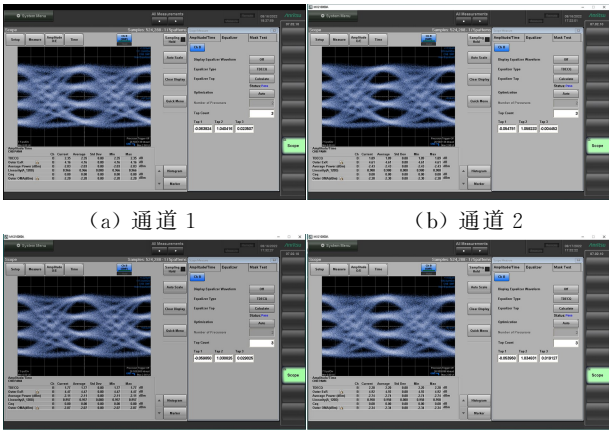


图 8 倾斜角度对耦合效率的影响

4 测试结果

项目最终形成 200 Gbit/s PAM4 光发射组件，并搭建了应用测试平台测试了组件样品的关键参数指标，包括发射光功率、消光比、TDECQ、线性度等，测试条件为：常温下，输入 4 路 50 Gbit/s 的 PAM4 数字信号，在无外加滤波器的情况下进行测试，测试结果如图 9 和表 1 所示。测试结果表明：研制的 200 Gbit/s PAM4 光发射组件样品参数指标满足光收发模块的使用需求。



(a) 通道 1 (b) 通道 2

(c) 通道 3 (d) 通道 4

图 9 组件样品 PAM4 光眼图

表 1 组件样品主要参数指标

指标	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
发射光功率/dBm	5.6	6.8	6.6	6.4
消光比/dB	4.2	4.6	4.5	4.9
TDECQ/dB	2.35	1.89	1.77	2.20
线性度	0.97	0.98	0.96	0.96

5 结论

设计了一款 200 Gbit/s 的光发射组件，开展了集成封装技术研究，进行了高速传输链路的信号完整性分析，优化了元器件互连金丝的寄生参数，同时对光纤耦合输出链路的耦合效率进行了模拟、仿真，通过优化贴片偏移和倾斜角度，使其耦合效率达到 60%以上。测试结果表明：研制的光发射组件的单通道传输速率达到 50 Gbit/s，整体数据信息传输速率达到 200 Gbit/s，输出光功率大于等于 5.5 dBm，消光比大于等于 4.2 dB，TDECQ 小于等于 2.4 dB，线性度大于等于 0.96，体积为 12 mm×7.5 mm×3.1 mm，满足光收发模块的使用需求。具有高数据信息传输速率、高集成度、抗干扰能力强等特点，可广泛应用于各种光收发模块和通信系统。

参考文献：

[1] 金 琦，胡 毅. 100/400 Gbit/s PAM4 光收发模块的技术分析[J]. 光通信研究，2016(2)：33-36.
Jin Qi, Hu Yi. Analysis of 100/400 Gbit/s PAM4 optical transceiver module technology [J]. Study on Optical Communications, 2016(2): 33-36.

[2] 王智勇. 100 G 客户侧高速光模块用光发射组件(TOSA)的研究进展[J]. 仪器仪表与分析监测，2015(1)：1-6.
Wang Zhiyong. Progress of transmit optical sub-assembly (TOSA) for 100G client side optical module [J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2015(1): 1-6.

[3] Yu H, Korn D, Pantouvaki M, et al. Using carrier-depletion silicon modulators for optical power monitorint [J]. Opt. Lett., 2012, 37(22): 4681-4683.

[4] Hall S H, Hall G W. High-speed Digital System Design: A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices[M]. Wiley-IEEE Press, 2000.

[5] Zhang H, Blackburn T R, Phung B T, et al. A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements. 1. WT de-noising algorithm[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 3-14.

作者简介：

周本军(1981—)，男，硕士，高级工程师，主要从事光信号处理和光电器件研究。