

doi:10.13756/j.gtxyj.2022.03.010

光电器件研究与应用

400 Gbit/s QSFP-DD SR8 光收发模块的研究

彭家辉¹, 孙莉萍², 付永安², 张尔康², 张德玲², 倪鹏远²

(1. 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074; 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要:随着第五代移动通信(5G)网络全面部署,光通信产业进入到全面快速发展的阶段。根据数据中心光模块的市场需求,光模块在未来必然向高速率和低价格方向发展。文章所研究的400 Gbit/s双密度四通道小型可插拔封装(QSFP-DD)光收发模块采用近高斯光束理论进行光路设计,并通过ZEMAX软件进行光路仿真分析,使用优化函数对球面参数进行优化,最终得到耦合效率为74.8%,分析不同偏移下的耦合效率以得到误差范围。对接触面的菲涅尔反射进行分析,对比不同研磨角度下的器件性能以及模块高温传纤测试,通过对比选择斜8°进行适配。根据实验结果对比协议要求,文章的光路设计搭配斜8°的光纤可以很好地满足使用场景。

关键词:数据中心;光通信;400 Gbit/s光模块;光路仿真;回波损耗

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2022)03-0055-06

Design of 400 Gbit/s QSFP-DD SR8 Optical Transceiver Module

PENG Jia-hui¹, SUN Li-ping², FU Yong-an², ZHANG Er-kang², ZHANG De-ling², NI Peng-yuan²

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China;

2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: With the full deployment of 5th generation mobile communication network, the optical communication industry has entered the stage of comprehensive and rapid development. According to the demand of data center optical module market, the optical module will develop to high speed and low price in the future. The 400 Gbit/s Quad Small Form Factor Pluggable-Double Density (QSFP-DD) studied in this paper is based on the theory of near Gauss Beam. The optical path is designed and simulated by ZEMAX software, and the spherical parameters are optimized by the optimization function. The coupling efficiency is 74.8%, and the coupling efficiency under different offset is analyzed to get the error range. After analyzing the Fresnel reflection of the contact surface, and comparing the performance of the device under different grinding angles and the high-temperature fiber transmission test of the module, an oblique 8° for adaptation is selected. According to the requirements of the protocol, the optical design of this paper with 8° angle optical fiber can meet the requirements of the use of the scene.

Key words: data center; optical communication; 400 Gbit/s optical module; simulation of light path; return loss

0 引言

随着云计算和大数据等物联网新技术的商用化以及第五代移动通信(5th Generation Mobile Communication, 5G)建设的逐步落地,在数据中心传输的流量呈指数式增长^[1-2]。Synergy的研究表明,截止到2020年底,全球主要超大规模数据中心总数已增加到了近600个,是5年前的两倍^[3]。数通光模块市场随着数据中心数量的增加也迎来了发展契机,根据知名调研机构统计,2019年,在数据中心所使用的光模块达到了5000万只,预计在2021年底数据中心的光模块市值将超过49亿美元。原有的100 Gbit/s光模块速率满足不了现有的使用场景,提升光模块的速率满足传输要求势在必行。其中满足电气与电子工程协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 802.3cm协议的

400 Gbit/s双密度四通道小型可插拔封装(Quad Small Form Factor Pluggable-Double Density, QSFP-DD)短距离(Short Range, SR) 8光模块凭借着高速率、低功耗、低成本以及小体积等优势在数据中心必将成为主流光模块^[4-5]。本文提出了基于板上芯片封装(Chip on Board, COB)技术的400 Gbit/s QSFP-DD SR8光模块的光路设计方案,采用收发一体透镜设计光路并进行仿真优化,根据菲涅尔反射选择增加接触面角度来减小反射,选取适当的斜面,确定方案后分别对模块的收端和发端进行测试,验证了光路设计的可行性。

1 耦合理论分析

在半导体激光器中,光子在谐振腔中来回振荡传播,其横截面的能量遵守高斯函数,故称这样的光场为激光谐振腔的横模辐射场,出射光束称为高斯

收稿日期:2021-10-29

作者简介:彭家辉(1997-),男,湖北荆门人。硕士,主要研究方向为光器件与光模块。

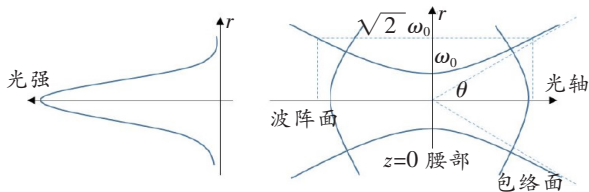
通信作者:孙莉萍,高级工程师。E-mail:liping_sun@accelink.com

光束,其模场分布为^[6]

$$E(x, y, z) = \frac{A_0}{\omega(z)} \exp\left[\frac{-(x^2 + y^2)}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left[-ik\left(\frac{x^2 + y^2}{2R(z)} + z\right) + i\varphi(z)\right], \quad (1)$$

式中: A_0 为常数因子; i 为虚数; x, y 和 z 为其分布坐标; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长; $\omega(z)$ 为光斑半径; $R(z)$ 为波面曲率半径; $\varphi(z)$ 为相位因子。

图 1 所示为高斯光束传播图。



注: r 为场点距离光轴的径向距离; ω_0 为束腰半径; θ 为发散角。

图 1 高斯光束传播图

高斯光束的光斑半径、曲率半径以及相位因子分别表示如下:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2}\right)^2}, \quad (2)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z}\right)^2\right] = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z}\right)^2\right], \quad (3)$$

$$\varphi(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right) = \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2}\right). \quad (4)$$

式中, z_0 为光束最细处的束腰。

高斯光束在 z 为常数的面内场振幅以高斯函数分布从中心向外逐步减小,其束腰逐渐发散。用发散角 θ 来衡量光束发散程度,在图中可以表示为渐近线的夹角, θ 的表达式为

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{d\omega}{dz} \approx \frac{\lambda}{\pi \omega_0}. \quad (5)$$

分析发射端的光束模型,发端和收端为两条独立的光路,但是可以采用相同的办法和理论进行分析。光电二极管(Photo Diode, PD)接收来自多模光纤的光束,光纤端面模场分布可由波导方程解出。对于多模光纤,其端面的模场分布为

$$E_{\text{fm}}(x, y) = E_{\text{fm}0} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_{\text{fm}}^2}\right), \quad (6)$$

式中: $E_{\text{fm}0}$ 为多模光纤的场振幅; ω_{fm} 为纤芯半径。当光从多模光纤中出来时,由于光源产生的模式中存在高阶模式,所以对于多模光纤的出射场分布同样以高斯光束作为光源从多模光纤中射出,其分布可表示为^[7]

$$E_{\text{fm}}(x, y, z) = E_{\text{fm}0} \frac{\omega_{\text{fm}}}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right) \times$$

$$\exp\left[-j[kz - \varphi(z)] - jk\left(\frac{r^2}{2R(z)}\right)\right], \quad (7)$$

式中, j 为虚数。光纤与光束的耦合常用方式有单透镜耦合和双透镜耦合,单透镜耦合需要解决像差问题,难以将具有发散角的光束汇聚到一个小范围内,所以耦合效率较低。采用双透镜耦合可以很好地解决上述问题,双透镜方案中发端 lens_1 通常为短焦距和大数值孔径的非球面透镜,用来完成光束的准直以及发散角压缩; lens_2 为长焦距和小数值孔径的聚焦透镜,用来完成光束与多模光纤模场的匹配。

2 光路设计与仿真

在数据中心短距传输中,均选用垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)作为光源,为了满足模块封装协议标准,需要对光路进行转折,使得 VCSEL 发出的垂直光能够平行进入到光纤中。要求模块稳定出光功率,需要对 VCSEL 工作状态实时监控,增加分光片将 VCSEL 发出的一部分光反射到监测光电二极管(Monitor Photo Diode, MPD)上,进行背光检测控制稳定出光功率,得到整体光路架构^[8-10]。

发端采用 VCSEL 作为光源,需要将垂直光转折为平行光耦合进入光纤中进行传输。首先将 VCSEL 发出的光进行准直,进入到透镜中,通过 45° 的面进行全反射将垂直发射的光束转折后水平入射到光纤中。由于需要对 VCSEL 进行监控,增加分光片后需要考虑其厚度对光路的影响,通过控制分光片的倾斜角度来调整 MPD 的位置,改变分光片上反射膜的透射率调整光功率范围。初始物像距关系由机械空间得到,设定物距为 0.34 mm , 相距为 0.45 mm 。图 2 所示为发端的光路示意图。

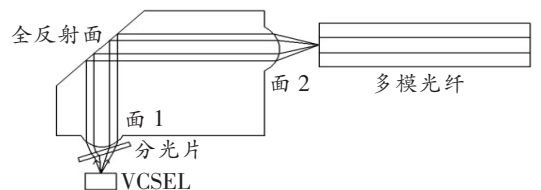


图 2 发端的光路示意图

收端与发端类似, PD 接收光纤的水平入射光,首先经过光纤端透镜球面准直,通过 45° 的全反射面将入射光束转折,再经过透镜将光束准直,最后由 PD 接收。由于采用的是收发一体的透镜,在设计过程中需要保证收端与发端的物距一致。由于有分光片的折射作用,收端与发端的像距并不一样,通过计算在分光片倾斜 20° 下,厚度为 0.1 mm 的分光

片将会使光路在 Y 轴方向偏移 0.012 mm,所以透镜上收端与发端的像距会相差 0.012 mm。确定收端的物距为 0.23 mm,像距与发端一致为 0.45 mm。图 3 所示为收端的光路示意图。

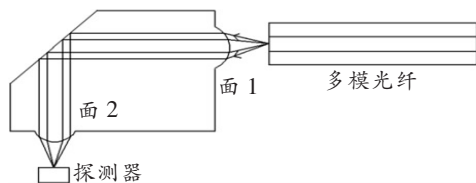


图 3 收端的光路示意图

3 光路仿真及优化

收端与发端的主要参数如表 1 所示。

表 1 光学系统主要参数

VCSEL	发射端		接收端		光纤端	
发光孔直径/ μm	发散角/ $^\circ$	焦距/ μm	PD 孔径/ μm	焦距/ μm	纤芯直径/ μm	数值孔径
12	36	340	30	230	50	0.2

选用表 1 物像关系及光路结构,通过 ZEMAX 软件进行透镜耦合光路的设计仿真,优化函数来调整两个球面的面型对耦合效率进行优化,然后改变光纤的接触角度,通过设置不同的角度来进行仿真。图 4 所示为透镜耦合系统的发端光学仿真图^[11-14]。

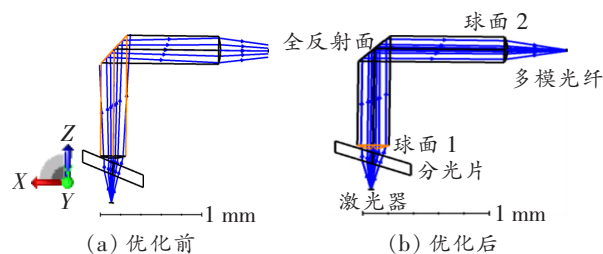


图 4 优化前后发端的光学仿真图

由图可知,优化前与优化后的光斑汇聚程度有很大区别,优化前有部分光已经损失,在光纤侧接收到的光斑较大,很多光难以进入到光纤中,耦合效率很低。优化后的光路能够实现光路的汇聚以及更高的耦合效率。

完成了光路的设计与仿真,需要考虑实际情况。在生产制造中,由于工艺的偏差,VCSEL 贴片的误差以及透镜光口间距生产的误差,胶水在高温固化中的应力释放导致的偏移等,这些因素都使得实际的耦合效率难以达到理想的情况,需要进行容差分析,模拟生产的实际情况。

将 VCSEL 偏移后分别在 X、Y 和 Z 轴方向上的容差如图 5 所示,由图可知,只要将 3 个方向的精度

控制在 $\pm 9 \mu\text{m}$ 的范围内耦合效率都大于 70%,但是考虑到实际过程中可能存在不止一个方向上的偏移,将贴片误差控制在 $\pm 3 \mu\text{m}$ 内,使得系统有较高的余量来防止耦合效率的下降。在耦合时将光纤插进透镜中,可以看作一个整体,实际使用中耦合透镜之后再行短纤粘接,可能存在耦合时较好但在装完短纤后出现产品性能不达标的情况,通常是由于耦合光纤与短纤的尺寸不一致或粘接位置并不是有源耦合时的位置导致的,所以可通过移动光纤来仿真光纤移动时的容差。图 6 所示为移动光纤耦合效率的变化,由图可知,在 X、Y 和 Z 方向都有 $30 \mu\text{m}$ 的容差。移动透镜的位置直接反映了光路设计的容差范围,图 7 所示为移动透镜耦合效率的变化,由图可知,在产品的实际耦合中需要选用一致性较好的电机,否则偏差过大容易导致实际位置与理想光路的偏移。

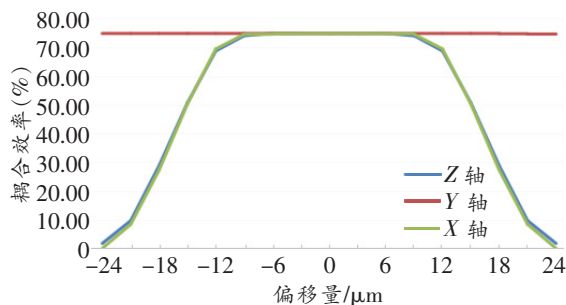


图 5 移动 VCSEL 耦合效率的变化

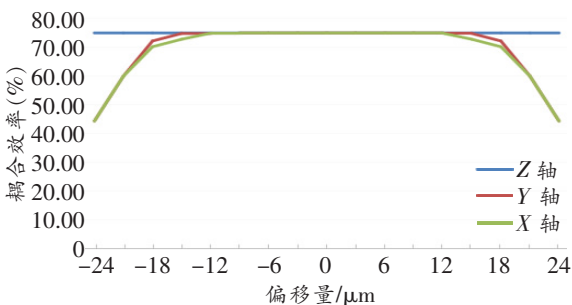


图 6 移动光纤耦合效率的变化

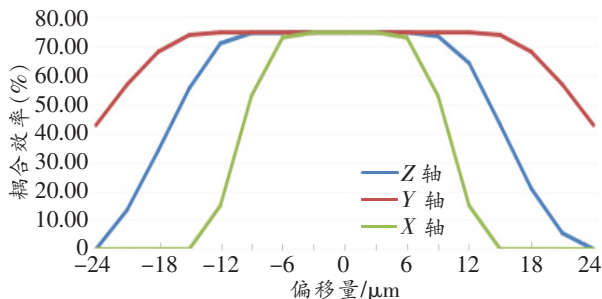
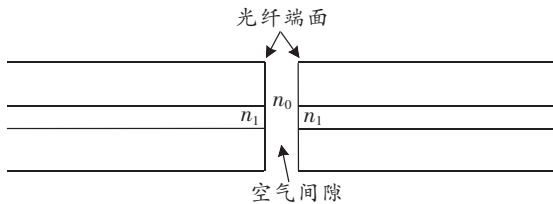


图 7 移动透镜耦合效率的变化

在光模块互联的过程中,两个插芯接触时难免

会产生间隙,此时折射率会发生变化,在接头处就发生菲涅尔反射。图8所示为光纤接头处的菲涅尔反射,由图可知,在光模块互联的过程中,由光纤1出来的光进入空气间隙中会发生一次菲涅尔反射,再从空气间隙中进入光纤2中时又会产生菲涅尔反射,由此可见,只要存在空气间隙就会产生两次反射,由于连接端距离 VCSEL 较近,VCSEL 会将反射光重新受激发射,产生噪声造成接收端突发误码,影响模块性能^[15-16]。



注: n_0 为空气的折射率; n_1 为光纤的纤芯折射率。

图8 光纤接头处的菲涅尔反射

本文采用在两个光纤接触面增加倾斜角,改变反射光的方向使其不满足全反射的要求从包层出去,不再回到 VCSEL 芯片中,减小模块的反射,提升模块性能。通过对不同倾斜角的仿真分析以及模块测试结果,最终选取合适的倾斜度,如图9所示。

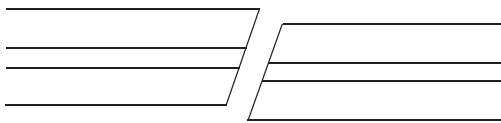


图9 光纤接头处增加倾斜角度

根据高斯光束耦合理论可以得到在不同的研磨角度下的反射系数 R 为

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{\pi n \omega_0 2O}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (8)$$

式中: R_0 为平面时的菲涅尔反射系数; n 为包层折射率; O 为端面倾斜角度。在实际使用中还需要综合考虑光功率以及环形光通量 (Encircled Flux, EF) 的大小,选取合适的倾斜角度。

4 实验验证

通过测试 400 Gbit/s QSFP-DD 器件的 EF 以及收端的响应度来衡量改变倾斜角度后产品性能的变化。改变倾斜角度会改变光路的像距,收发端由于焦距不同,而变化相同的像距,物距变化不一致,从而导致产品光路发生变化。在多模光通信系统中,VCSEL 的 EF 被用来定义 VCSEL 发射传输的

光特征,响应度用来衡量 PD 光电转换性能,同时也能衡量收端光路性能,通过响应度测试能够计算收端耦合效率。表2所示为不同倾斜角度下的发端光功率、EF 以及收端响应度^[17]。

表2 不同倾斜角度下的器件测试

倾斜度/ $^{\circ}$	光功率/dBm	EF (%) ($R = 4.5 \mu\text{m}$)	EF (%) ($R = 19.0 \mu\text{m}$)	响应度/A/W
0	1.5	20.0	99.2	0.54
5	1.3	17.6	95.5	0.53
8	1.2	15.2	93.8	0.52
12	1.0	12.1	89.6	0.44
15	0.4	11.5	86.3	0.38

通过测试模块的高温自环性能衡量模块的业务能力,反射光会造成模块突发误码。将误码仪的码型调整为 PRBS31Q,将模块的收与发通过自环纤连接起来,测试其随温度变化而产生误码的情况^[18]。由表2可知,除了 15° 时的响应度以及 EF 劣化至范围外,其余都是在范围内 ($R = 4.5 \mu\text{m}$ 时, $EF < 30\%$; $R = 19.0 \mu\text{m}$ 时, $EF \geq 86\%$), $4.5 \mu\text{m}$ 时的 EF 下降可以有效减小反射。图10所示为测试模块的实时误码率以及总误码率随温度的变化,不同颜色分别代表不同的通道,横坐标为测试时间,纵坐标最上面的代表不同通道的总误码率,中间表示不同通道的实时误码率,下面代表模块的温度变化。由图10(a)和10(b)可知,在选择平面光纤连接以及 5° 的连接时仍然会有突发误码产生,图10(d)所示为选择 12° 连接时收端性能已经有所下降,所以最终选择 8° 斜纤适配可以有效兼顾性能以及降低反射影响。

在对 400 Gbit/s QSFP-DD 模块测试中,发射端由误码仪产生 31 阶的信号源,通过 8 对差分射频线与待测光模块连接,模块眼图测试如图11所示,接收端主要测试模块的灵敏度。通过改变环境温度测试模块收发端在常温、低温和高温下的工作情况,其结果如表3~5所示。测试模块的眼图以及 3 温状态下灵敏度、消光比、光调制幅度 (Optical Modulation Amplitude, OMA) 以及发射机色散眼图闭合四相 (Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary, TDECQ) 等来评估光路设计效果,从测试数据发现,模块在 3 温下的工作状态比较稳定,通道差异性较小,均在协议范围内且有较大的余量。

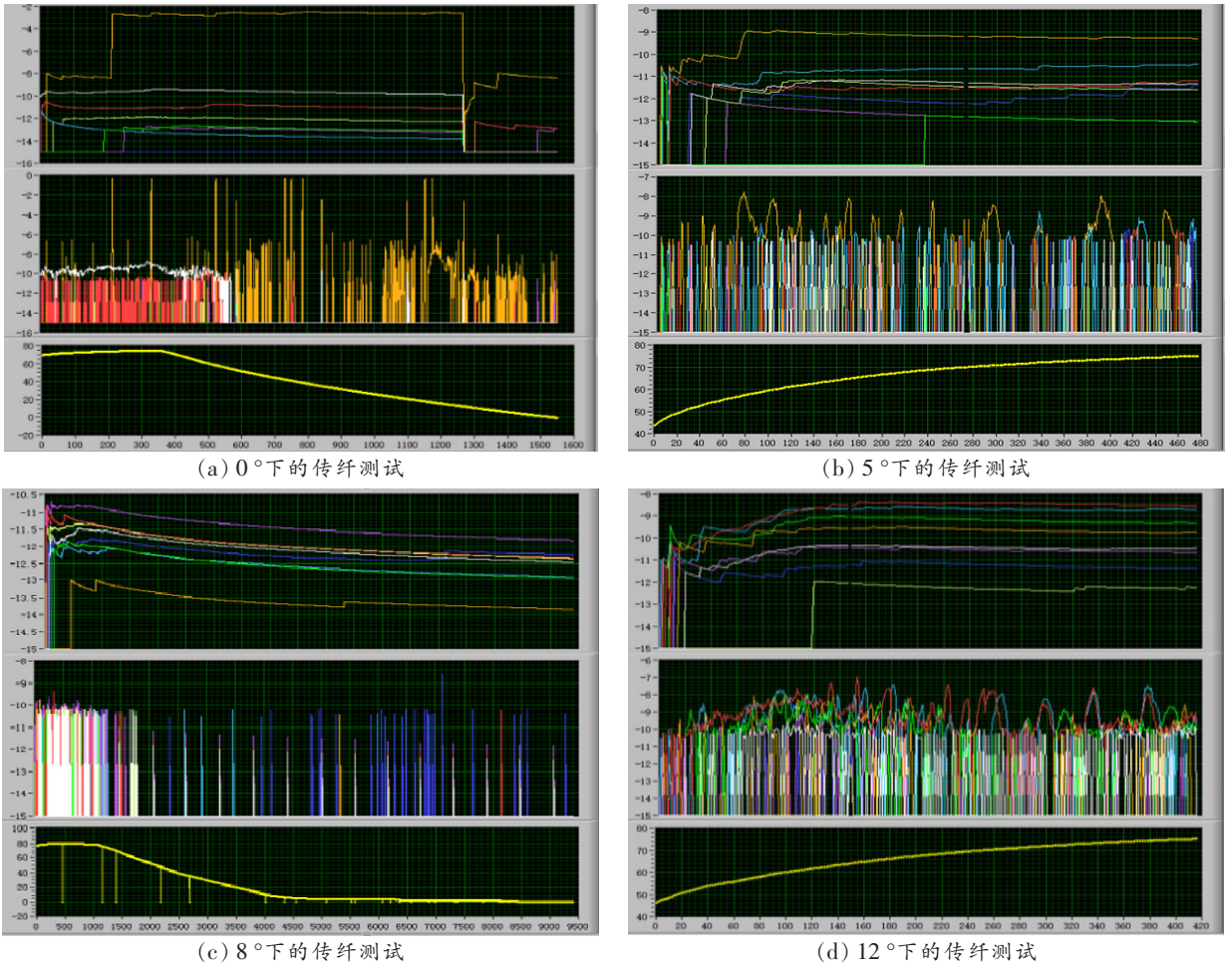


图 10 不同倾斜角度下的高温传纤测试

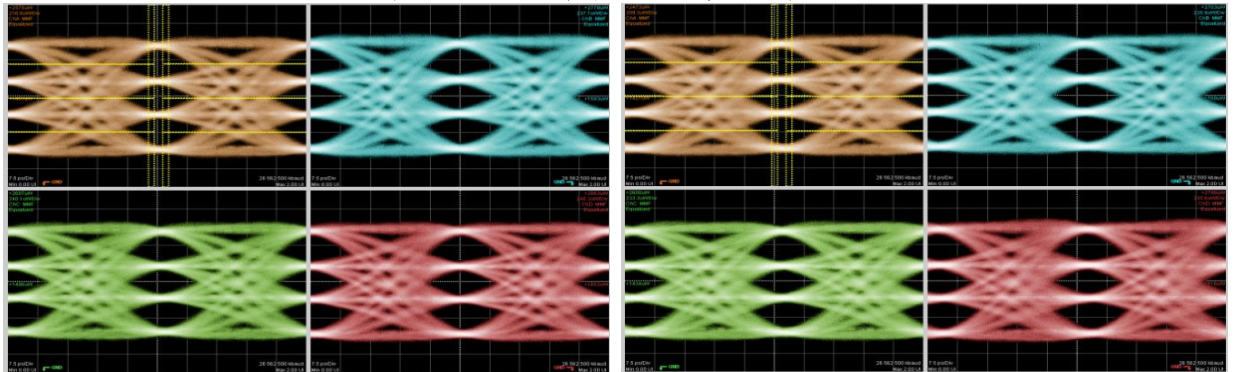


图 11 模块眼图测试

表 3 常温状态光模块性能测试结果

通道	功率/ dBm	灵敏度/ dBm	消光比/ dB	OMA/dBm	TDECQ/dB
1	1.88	-10.41	3.78	2.16	0.61
2	2.25	-10.12	3.87	2.55	0.69
3	1.80	-10.55	4.00	2.43	0.63
4	2.16	-10.43	3.88	2.60	0.66
5	1.75	-10.13	3.90	2.02	0.69
6	2.20	-10.32	4.02	2.25	0.73
7	1.60	-9.95	4.21	2.09	0.65
8	2.09	-10.22	4.12	2.37	0.69

表 4 低温状态光模块性能测试结果

通道	功率/ dBm	灵敏度/ dBm	消光比/ dB	OMA/dBm	TDECQ/dB
1	2.39	-11.32	4.58	0.98	0.78
2	2.90	-10.95	4.42	1.30	0.81
3	2.44	-11.26	4.51	1.17	0.88
4	2.70	-11.04	4.50	1.40	0.80
5	2.34	-10.98	4.48	1.10	0.82
6	2.77	-11.12	4.26	1.05	0.80
7	2.36	-10.78	4.42	1.05	0.74
8	2.53	-11.16	4.41	1.22	0.79

表5 高温状态光模块性能测试结果

通道	功率/ dBm	灵敏度/ dBm	消光比/ dB	OMA/dBm	TDECQ/dB
1	1.08	-10.12	3.73	0.25	0.65
2	1.19	-9.72	3.85	0.19	0.72
3	1.01	-10.34	3.98	0.06	0.70
4	1.26	-10.08	3.83	0.34	0.66
5	1.02	-9.82	3.86	0.27	0.73
6	1.14	-10.23	4.10	0.38	0.77
7	0.98	-9.46	3.78	0.10	0.72
8	1.22	-10.03	3.83	0.16	0.73

5 结束语

本文所提 400 Gbit/s QSFP-DD SR8 光收发模块的 COB 设计方案,通过光路设计和仿真,得出在 3 个轴下容差宽度、耦合效率以及不同误差下的耦合效率变化,为器件的生产提供了指导;测试不同研磨角度下器件性能和误码情况,最终确定了以 8° 角进行适配;同时搭建模块测试台位,测试其性能满足 IEEE 802.3cm 协议标准,与设计指标要求符合。本设计在一定程度上提高了产品性能,降低了光路反射,是下一代数据中心的不二之选。

参考文献:

[1] 刁兴玲,王光全. 5G 和云对光网提出三要求:光模块成本亟待降低[J]. 通信世界, 2018, 17(2):41.

[2] Gupta A, Jha R K, Devi R. Security Architecture of 5G Wireless Communication Network[J]. International Journal of Sensors Wireless Communications and Control, 2018, 8(2):92-99.

[3] 王宏宇. 光模块在数据中心的应用研究[J]. 电脑迷, 2018(7):256.

[4] 匡杨,胡毅. 400 Gbit/s 光模块的技术浅析[J]. 光通信研究, 2012(1):41-45.

[5] 陈苏,孙莉萍,任海兰,等. 400 GE 客户侧光收发模块的技术方案[J]. 光通信研究, 2016(1):51-54,58.

[6] 施亚齐,戴梦楠. 激光原理与技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2012.

[7] 金阿立,周斌,乔显金,等. 一种半导体激光器多模光纤耦合技术[J]. 科技创新导报, 2019, 16(12):99-101.

[8] 郭焱. 数据中心用 28 Gbit/s 光收发组件的设计开发[D]. 武汉:武汉邮电科学研究院, 2018.

[9] 程鹏,孙莉萍,薛振峰. 一种可调突发激光器的光路设计[J]. 光通信研究, 2018(4):52-55.

[10] 杨松,李俊洋,蔡志岗. 100 G SR4 并行光模块光电子集成封装的研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(3):152-156.

[11] 陈莹,宋文泰,何慧敏,等. 4×25 Gb/s 光电收发一体模块封装的设计与实现[J]. 光通信技术, 2021, 45(4):22-26.

[12] 金琪,蒋金宏,李勇奇,等. 一种 40 Gbit/s QSFP+ 并行光模块光路设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(6):41-44.

[13] 曹曦文. 小芯径 ($50 \mu\text{m}$) 高亮度半导体激光器的光纤耦合设计[D]. 长春:长春理工大学, 2016.

[14] 石科仁,朱长青. 基于 ZEMAX 的激光与多模光纤耦合系统设计[J]. 光通信技术, 2016, 40(5):43-45.

[15] 胡为良,毛继宏. 多模光纤系统中回波损耗的测量[J]. 国外电子测量技术, 2001(3):29-31.

[16] 汤钧,李俊,袁燕飞,等. 基于衍射理论的光纤连接器倾斜端面回波损耗分析[J]. 现代传输, 2020(3):53-55.

[17] 肖刚,马洪勇,胡毅,等. 一种用于 400 Gb/s 光模块测试的低成本 PAM4 信号 BERT[J]. 光通信技术, 2021, 45(10):19-23.

[18] 肖刚,胡毅,杨俊麒,等. 400 Gb/s 热插拔光收发模块测试系统研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(2):56-62, 67.