

激光器封装耦合容差分析

张 彩^{1*}, 刘佳焱², 王晴晴³

(1. 大连东软信息学院 智能与电子工程学院, 辽宁 大连 116000;

2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100000;

3. 芯联新(河北雄安)科技有限公司, 河北 雄安 050004)

摘要: 传统高速 100G 激光器一般采用长方形可伐合金壳体即 BOX 封装, 成本较高; 新兴的单波 100 G 激光器逐步采用同轴封装, 在物料成本上可降低约 50%, 但由于同轴封装内部集成制冷器和使用单透镜方案, 因此在光路控制方面存在公差和不确定性, 导致激光器外形尺寸结构的差异, 在后期光模块的装配中存在匹配问题, 且不良率较高, 批量生产控制成本较高。本研究通过理论分析和 ZMAX 仿真, 分析了激光器长度与偏位容差的关系, 讨论了耦合效率与激光器长度和偏位容差的变化趋势与控制方法; 在理论分析和仿真结果的基础上, 对激光器封装进行了实验验证; 提出激光器长度和偏位容差的控制方法及解决方案, 对实际批量生产中提高激光器耦合效率, 降低成本、提高生产效率具有指导意义。

关键词: 激光器; 耦合效率; ZMAX; 容差

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240023

Analysis of Coupling Tolerance in Laser Packaging

ZHANG Cai^{1*}, LIU Jiayao², WANG Qingqing³

(1. School of Intelligent and Electronic Engineering, Dalian Neusoft University of Information, Dalian 116000, China;

2. Institute of Semiconductor CAS, Beijing 100000, China;

3. Xinlianxin (Hebei Xiong'an) Technology Co., Ltd., Hebei 050004, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhangcai@neusoft.edu.cn

Abstract: Traditional high-speed 100G lasers are generally by rectangular kovar alloy shells, also known as BOX packaging, which has high cost. Emerging Single-Wavelength 100G lasers are gradually adopting coaxial packaging, which can reduce material costs by about 50%. However, due to the integrated refrigerator inside the coaxial package and the use of a single lens solution, there are tolerances for the above two in mass production. There are tolerances and uncertainties in the optical path control, resulting in differences in the size and structure of the laser's appearance. This leads to matching issues during the assembly of the later optical modules, resulting in higher defect rates and higher costs of batch production control. In this study, the relationship between laser length and positional tolerance was analyzed through theoretical analysis and ZMAX simulations. The coupling efficiency was discussed in relation to the trends and control methods of laser length and positional tolerance. Experimental verification of laser packaging was conducted based on the theoretical analysis and simulation results. Furthermore, control methods and solutions for laser length and positional tolerance were proposed, which have guiding significance for improving laser coupling efficiency, reducing costs, and increasing production efficiency in actual batch production.

Key words: laser; coupling efficiency; ZMAX; tolerance

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62375257); 集成化半导体激光器及光放大发射组件(2020YFB2205901)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (62375257); Integrated semiconductor laser and optical amplification emission module (2020YBB2205901)

1 引 言

当今时代光通信行业迅速发展、不断进步,且随着对高速通信、高清视频及无人驾驶需求的不断增加,对光通信质与量的要求更为严苛,当前5G时代的迅猛提速以及6G白皮书的发布,对高速半导体激光器的性能、封装成本控制要求显著提高。因此高性能,低成本,高成品率是光器件厂商的核心竞争力。

传统高速半导体激光器主要采用方形可伐合金壳体BOX封装方案,成本较高。为了降低成本,各大器件厂商逐步开发低成本的同轴封装方案。在国外,日本三菱公司在同轴封装上占有绝对优势,解决了同轴高频传输以及散热的问题,率先推出了高速同轴带制冷半导体激光器,例如单波100G同轴封装激光器。直到2022年开始,国内激光器件厂商陆续开始研发,国内海信,光迅等知名公司迅速投入开发^[1],并于2023年初,逐步推出单波100G同轴方案产品,开始小批量生产,封装尺寸逐渐微型化,同轴底座代替陶瓷可伐合金方形壳体,封装物料成本逐步降低,但同时又引入新的问题,激光器外形尺寸在批量生产中难以控制^[2]。

对于同轴激光器外形结构,传统非制冷同轴激光器对同轴长度和同心度技术指标要求不高,因为光模块内部空间较大,装配基本没有问题。但是高速带制冷半导体激光器由于其应用场景不同,配套光模块对其封装尺寸结构要求较高。由于同轴带制冷激光器内部集成制冷器TEC,基板,甚至反射片^[3]等多个元件,外围封装采用单透镜聚焦光斑,内部多个元器件均存在公差,经过透镜后的焦距会延长、缩短或者偏移,其距离和透镜的倍数有关系^[4]。这会导致封装完成的激光器外形尺寸发生变化,这是高速同轴带制冷半导体激光器封装^[5]的一个痛点。

当前一些激光器件厂商往往通过两种方法避免这个问题,第一种,在封装完成后进行尺寸的筛选归类,然后适配不同光模块去组装,这增加了激光器的封装筛选成本,并且筛选出来的产品可能无法使用而造成积压。部分高速同轴带制冷半导体激光器厂商在批量生产中一般存在至少10%的结构损失,同时,工时也会有所浪费,无形中又增加了人工成本。第二种,部分厂商从生产前端去控制,控制制冷器和基板的厚度,对原材料供应

商提出更高的精度要求,通过控制原材料的精度达到高度的控制,常规制冷器TEC的高度公差为 $\pm 0.05\text{mm}$,基板的高度公差为 $\pm 0.025\text{mm}$,如果精度提高到 $\pm 0.01\text{mm}$,价格将分别上调56%和50%,物料成本大大提升。如何在低成本下更好的控制同轴带制冷半导体激光器封装外形结构,并可实现批量化生产,是所有厂商面临的问题。

本文对高速同轴带制冷半导体激光器封装进行结构建模。通过ZMAX仿真分析光路的耦合效率以及容差,得到长度和偏位容差,在原物料不变的情况下,仅通过改变反射片的位置,达到控制光路的目的。在此基础上,通过实际装配进行验证,得到有效控制同轴带制冷半导体激光器封装尺寸结构低成本的方法,不仅可以在制程内进行有效控制,降低成品不良率,并且可以提升激光器的耦合效率,较大幅度降低成本和提升生产效率,适合批量化生产。

2 理论与方法

2.1 激光器光路建模

高速同轴带制冷半导体激光器件终端应用在SFP28, PAM4等光模块中,实现光通信数据光收发功能。此类光模块外部尺寸逐步小型化,这就要求对内部电路板以及激光器件尺寸严格控制。在模块装配中,器件通过卡位固定,所以此类激光器件的结构件尺寸控制精度较高。常规高速同轴带制冷半导体激光器的封装方案主要有两种,如下图1所示,立式封装图1(a)和卧式封装图1(b),两种封装都由制冷器(TEC),基板,半导体芯片(Chip),透镜(Lens),外围隔离器(Isolator)和光纤(Fiber)等组成,但在光路上存在差别,卧式封装通过一个45度反射片(Mirror)改变光路。经过团队多次研究和验证,立式封装在散热、贴装精度控制、焦距长度和偏位控制以及加工模具精度的要求都远远高于卧式封装,故卧式封装更具有优势。本研究主要基于卧式封装进行建模分析。

本研究主要针对高速同轴带制冷半导体激光器的卧式封装进行分析,封装外形结构如下图2所示,

底座上面到透镜lens入射面的距离 h_2 和透镜出射面到进入光纤的距离 d_3 是根据内部元件公差变化的,这部分变化量决定着透镜底座到光口前端的距离 L_1 的变化量,透镜和底座的厚度不变,不做考虑,如果 L_1 以及偏位控制不当,会引入

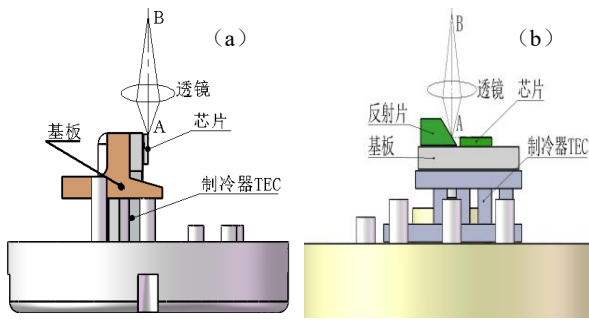


图1 同轴封装立式(a)和卧式(b)

Fig.1 Coaxial packaging vertical (a) and horizontal(b)

模块装配问题,偏位控制不当会提高光模块的高温失锁等风险,长度控制不当会导致光模块的功率不稳等现象,而功率和温控是高速光模块的两个关键参数,也是带制冷高速半导体激光器的重要性能指标^[6]。

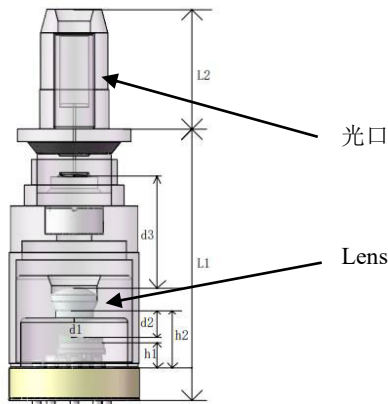


图2 同轴封装图

Fig.2 Coaxial packaging diagram

在工程上,要求光器件长度控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$,同轴度控制在 $\pm 0.1\text{ mm}$ 以内,在内部封装透镜高度固定的前提下,如果要达到最佳耦合效率,就需要控制透镜前后光路以及入射光的角度,在批量生产中往往不易控制,只能封装完成后进行结构尺寸的筛选,如果有效控制,则可大大提升生产效率并降低成本。本文通过理论仿真和实验进行控制方法的探究。

基于上图2,给出同轴内部光路模型,如图3所示,以透镜为中心,透镜下面为激光器入射光部分,透镜前焦距 f_1 为半导体激光器芯片发光端面到45度全反射片(Mirror)的距离 d_1 和从45度全反射片(Mirror)到透镜(lens)入射端面 d_2 之和,以及透镜部分厚度,透镜后焦距 f_2 为下图3中透镜(lens)出射端面到光纤端面距离 d_3 ,以及透镜部分厚度,因为透镜厚度是固定值,只需要考虑 d_2

和 d_3 的变化即可。光从激光器LD发射,经过45度全反射片(Mirror)最终耦合进入光纤(Fiber),在激光器封装中,往往透镜高度即透镜(lens)到同轴底座的距离 h_2 固定, f_1 的影响因素由 d_1, d_2 以及制冷器(TEC)的高度 h_1 决定,透镜前焦距 f_1 会影响后焦距 f_2 ,从而影响整个器件长度。此外,半导体芯片LD的横向贴装位置,直接决定了入射光到透镜的角度偏位,会影响进入光纤的位置,从而影响整个器件的同心度、偏位以及耦合效率。本文通过ZMAX仿真,分析透镜前贴装的位置和长度、偏位以及耦合效率的关系,并分析其容差,从工程应用标准出发,追踪到内部结构和控制参数,从而达到同轴激光器的外部结构参数控制。

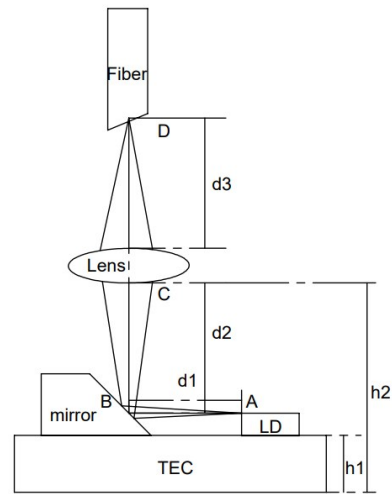


图3 同轴光路模型

Fig.3 Coaxial optical model

2.2 单模光纤耦合效率

空间光通信中所用的光纤是单模光纤,单模光纤纤芯直径一般为 $8\sim 10\ \mu\text{m}$,单模光纤的耦合效率一般指单模光纤系统中光纤芯之间或者光纤纤芯和光源之间的耦合效率,即光纤一个模式被激发而产生的能量传播^[7]。本文研究的是光纤纤芯和光源之间的耦合效率,即接收端所接收到光源发射端输出的能量百分比,耦合原理如下图4所示,选用可吸收外调制半导体激光器芯片EML^[8],EML芯片前端为常规DFB芯片,DFB芯片发光波导垂直和水平长度约 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,腔面面积约 $1\ \mu\text{m}^2\sim 4\ \mu\text{m}^2$,垂直发散角度45度,水平发散角40度,呈高斯光束发射,光束质量较好,因此相对于大尺寸的透镜来说,可近似把激光器芯片看似点光源,在仿真时,只需要把芯片发散角度输入,光束标为高斯光束即可。选取非球面透镜,透镜前

焦距 f_1 为 1.0 mm, 后焦距 f_2 为 4.52 mm, 光纤端的透镜面半径为 1.2 mm, 非球面透镜系数 K 为 -1.24, 激光器端透镜面半径 -2.1 mm, 非球面透镜系数 K 为 -1.56, 选材料 K -VC89, 为了防止反射, 光纤入射面为 8 度倾角。根据以上设定条件, 结合非球面透镜曲率半径参数进行仿真。激光光源 A 发出的光, 经过透镜汇聚到接收平面 B 处的 XOY 平面上, 单模光纤的耦合效率定义为进入单模光纤的光功率 P_o 与激光光源 A 发出的光功率的比值^[9], 通常激光光束通过透镜的透过率大于 98%, 可以忽略透镜光损失, 也可以认为激光到光纤的耦合效率为进入光纤的光功率 P_o 与到达 XOY 平面的光功率强度 P_{in} 的光功率比值, 即式(1):

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (1)$$

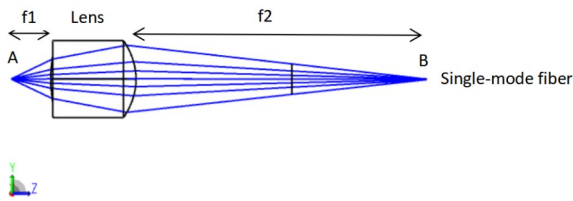


图4 激光到单模光纤的耦合

Fig.4 Coupling of Laser to Single Mode Fiber

根据 Parseval-Plancherel 原理, 该耦合效率也可以表示为式(2):

$$\eta = \frac{|\iint E_A^* U_A ds|^2}{\iint |E_A|^2 ds \cdot \iint |U_A|^2 ds} \quad (2)$$

其中, E_A 是接收平面的入射光场; U_A 是传播到接收孔径平面的光纤本征模, 同样表示接收平面光强度与激光发射的光经过透镜到达接收平面光强度的比值; 即光强度耦合到光纤中的能量效率^[10]。激光器的光功率损失主要在进入光纤的这部分损失, 本文实验测试采用耦合到光纤的光功率和经过透镜的积分功率的比值作为耦合效率实验数据。

2.3 长度容差分析及控制方法

本文根据光纤耦合理论, 进行 ZMAX 仿真, 选定针对 LD 激光束光路设计的一款透镜为模型^[11], 根据实际封装工艺, 透镜位置固定不变, LD 激光光束通过透镜的透过率 98% 以上, 通过 ZMAX 进行仿真, 设置图 4 的 f_2 为变量, 在不同的物距 f_1

下, 通过仿真优化 f_2 , 达到最佳耦合效率, 会得到如下图 5 的一组仿真结果。从图 5 看出, 选定特定透镜, 根据透镜规格, 工程器件理论中心尺寸一般为 11.8 mm, 公差控制在 ± 0.5 mm, 即图 2 中的 L_1 , 同轴底座下端到光口前端的距离, 为了满足光模块光接口标准, 一般工程器件 L_2 是固定值, 这样半导体激光器件的长度尺寸基本由 L_1 决定。从图 5 可以看出, 在这个范围内, 内部封装 f_1 控制在 0.95~1.06 mm 之间, 而通过卧式封装的方案, 对比同轴耦合光路图 3, 影响 f_1 的因素有 TEC 的高度 h_1 , 激光器发光面 A 到反射端 B 的距离 d_1 , 反射端 B 到透镜 C 的距离 d_2 这三者, 当然也包含各层的胶水黏合物厚度, 激光器芯片热沉厚度等以及各自的公差, 所以如果为了满足工程应用, 更好地控制整体器件的长度, 要合理调配上述 h_1 , d_1 和 d_2 三者关系, 这三者影响因素较多, 在实际工程中各层黏合物, 热沉, 以及各层公差等, 其中 TEC 公差因素影响最大, 而实际工程中 TEC 公差控制成本较高, 而 d_1 的调节成本较低, 所以只需要更改芯片和反射片的贴装距离即可实现, 所以可以对 TEC 按照高度 h_1 进行分类, 然后通过适当调节 d_1 的来满足三者之和不变, 达到控制器件长度的目的。从仿真图上也可以看到, 在 0.95~1.05 mm 容差范围内, 耦合效率在 60% 以上, 并且比较平缓, 激光器焊位位移影响会比较小, 这个范围比较理想^[12]。

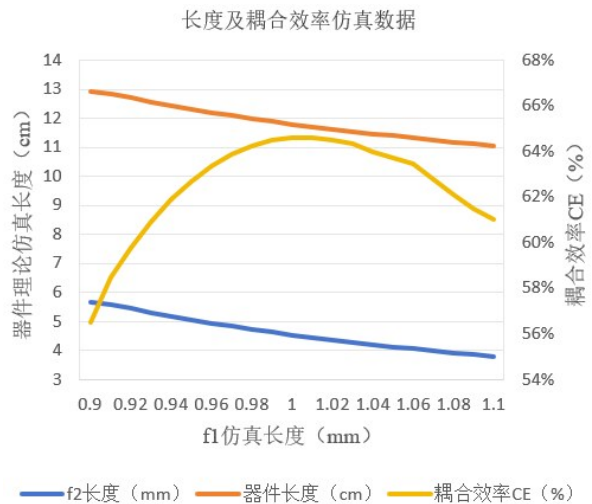


图5 长度及耦合效率仿真数据

Fig.5 Length and coupling efficiency simulation data

通过器件长度和耦合效率的综合分析, 可以从最终需求出发, 寻找内部控制距离参数, 选定参数, 然后聚焦到影响 f_1 参数的三个主要因素, 进

行合理分配高度,达到总高度公差在这个范围内,可以很好的达到需求,以满足终端的应用,同时可以在批量生产中有效控制成品率。

2.4 偏位容差分析及控制方法

用 ZMAX 进行仿真,仿真光路如下图 6 所示。激光器的位置理论上在底座的中心^[13-14],即透镜的中心 D 点,光束经过 f1 到达透镜,经过 f2 聚焦在透镜后面的 F 点,一般工程是允许 F 点有一定容差范围,一般要求控制在 $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内,从终端应用出发,通过 Y 的范围找到 D 的容差允许范围。

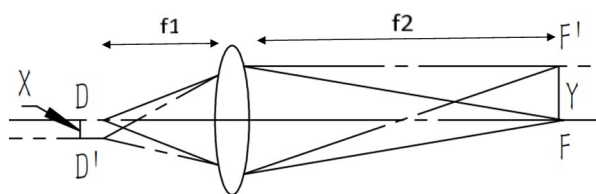


图 6 偏位光路图

Fig.6 offset optical path diagram

仿真结果如下图 7 所示,反射点位置在中心,可见卧式方案贴装的位置容差范围 D 在 $\pm 35 \mu\text{m}$,能满足 Y 的范围 $\pm 100 \mu\text{m}$ 。此外,从图中可以看到耦合效率最高并不是在正中心,而是在 $\pm 20 \mu\text{m}$ 处,可见适当偏位可以提高耦合效率。其次,从图中可以看到,如果想要光纤出光偏左,可以适当调节贴装的位置偏离中心右侧,如果想要光纤出光偏右,可以适当调节贴装的位置偏离中心左侧,两者方向相反,可以根据实际工程需要进行调节。

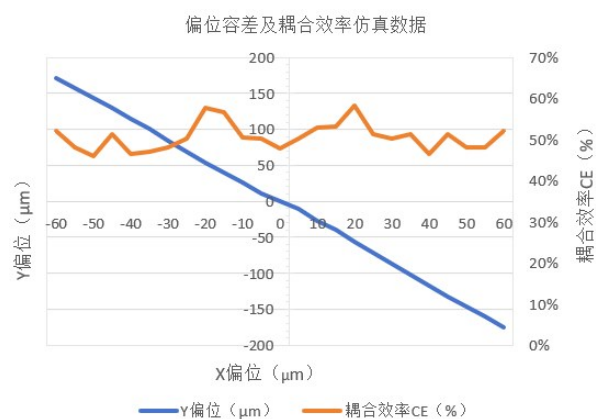


图 7 偏位容差及耦合效率仿真数据

Fig.7 Offset tolerance and coupling efficiency simulation data

2.5 小结

通过上面理论分析和 ZMAX 仿真,从工程应用出发^[15],可以推演到激光器封装之初的规范要求,通过仿真数据,可以清晰地找到器件封装长度

容差和偏位容差以及耦合效率的关系,通过光路模型,可以清晰地找到影响容差的因素。基于长度容差的分析,可以通过调节 h1, d1, d2 来达到可控范围,而从成本上考虑, d1 是最佳捷径,可大大降低成本,提升成品率;基于偏位容差的分析,同样从工程应用出发,可以调节反射片位置找到对应的偏位控制范围,并且通过适当调节偏位,可以提升耦合效率,因为光路通过透镜的汇聚,会把光路汇聚到 $9 \mu\text{m}$ 的光纤纤芯中,为了防止光的反射,一般会把光纤纤芯端面研磨 6 度或者 8 度的角度,如果光路垂直向上入射,入射光和光纤纤芯端面高点夹角为 6 度或者 8 度,如果光路有一定偏位,不同方向的偏位会导致夹角变化,此时转动光纤,总能找到某个方向上夹角变小,根据光路几何原理,这时会得到更高一些的耦合效率,也就是当偏位光路从光纤纤芯端面的高点方向入射,仿真结果验证了实际光路理论。

3 实验与讨论

3.1 实验方法

实验分为两组,分别验证器件长度和偏位的理论分析。实验一为验证长度偏差,实验中贴装激光器 33 支,要求贴装位置遍布仿真范围,贴装过程中,对每支激光器进行测量,标记 f1 高度,并记录数据,然后进行产品封帽和耦合测试,在达到最佳耦合效率时,记录耦合值,同时用游标卡尺工装测量 f2 高度以及最终器件的整体长度,即上图 2 中的 L1 的长度。经过封装后,测得 33 支数据如下图 8 所示,从数据分布上看,实际封装尺寸和仿真数据基本保持一致,如果终端要求器件长度控制在 $11.3 \sim 12.3 \text{ mm}$ 之间,在这个范围内,可以对应到 f1 的长度,要求贴装的距离 f1 控制在 $0.95 \sim 1.05 \text{ mm}$ 之间,从下图 8 可以看到此区间耦合效率较高。实验结果与仿真数据吻合(由于实验的随机性,每个长度区间贴装激光器数量不同)。

控制长度 f1 在 $1 \pm 0.1 \text{ mm}$ 的高度下,进行实验二,对激光器芯片进行不同的偏位贴装 41 支产品,同样记录每支激光器偏位信息,然后进行器件偏位尺寸并记录,得到如图 9 的偏位数据分布。

从图 9 可以看到上图 7 中 X 侧和 Y 侧对应的偏位信息,以及不同偏位的耦合效率值,实验数据和仿真结果吻合,可以根据 Y 侧的不同偏位要求,选择 X 侧的偏位距离,从图中可以看到在偏位区间在 $\pm 20 \mu\text{m}$ 左右处耦合效率最好。一般常规要

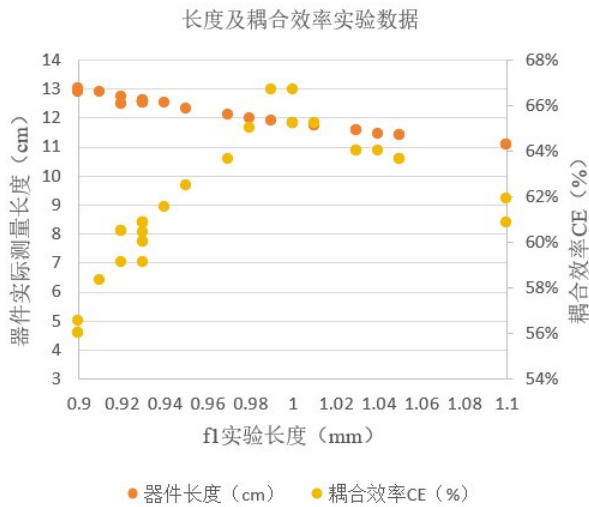


图8 长度及耦合效率实验数据

Fig.8 Experimental data of length and coupling efficiency

求偏位 Y 为 $\pm 100 \mu\text{m}$, 从图 9 中可以找到 Y 对应的 X 距离, 即 $\pm 35 \mu\text{m}$, 偏位 X 和 Y 的移动方向正好相反。

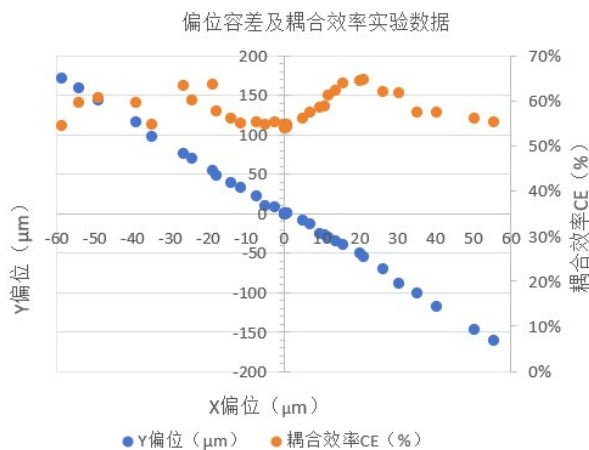


图9 偏位容差及耦合效率实验数据

Fig.9 Experimental data of offset tolerance and coupling efficiency

3.2 实验结果分析

通过实验一和实验二的验证, 可见实验数据和仿真结果吻合, 并且实际耦合效率略高于理论计算, 其一, 在仿真中规定透镜固定透射率 98%, 而实际中透镜透射率会更高, 甚至忽略; 其二, 在理论分析仿真中, 半导体激光器芯片发散角度设置较大, 水平方向设置 40 度, 垂直方向设置 45 度, 实际达不到这么大, 光斑会更小, 所以实际验证略高于理论计算。在封装过程中, 在长度控制上, 可以从终端应用出发, 寻找对应终端应用长度 f_2 的一组数据 f_1 , 然后通过激光器模型分析, 可以找到影响 f_1 的因素, 如 TEC 的高度, 焊料, 基板的高度

等, 控制 f_1 的方法有多种, 当前产商一般通过严格控制 TEC 以及基板的精度达成, 这样对生产厂商来说, 成本较高, 本文提出可以不限 TEC 的高度, 仅对其分类便可, 通过调节 45° 反射片和激光器芯片的出光位置来调节 f_1 , 达到最佳位置控制, 成本大大降低。对于偏位控制, 根据工程需求, 仍从终端出发寻找对应的内部偏位容差, 内部微米级别偏位可以引起外部较大的偏位, 内外位置和透镜倍率有关系, 通过实验可以看到, 同轴耦合效率最佳点并不在封装器件的中心位置, 而是有一定的偏位角度, 可以调节反射片的位置可以达到低成本的偏位控制。从而实现批产。

3.3 批产验证

按照上述控制方法进行小批量 100 支半导体激光器件的投产验证, 在耦合达到最大值后进行封装焊接, 然后对其进行每支长度和偏位的测量, 测量直方图数据如图 10 所示, 可见数据分布在可控理想范围内, 直方图显示已经达到了可批产的正态分布状态, 按照上述控制方法, 可以进行低成本的批量生产。

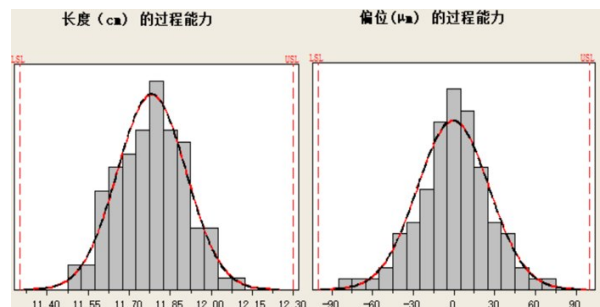


图10 统计数据

Fig.10 Statistical data

4 结 论

本文通过理论分析和 ZMAX 仿真分析了激光器的长度和偏位容差的关系, 以及耦合效率随激光器长度、偏位容差的变化趋势, 并通过实际封装进行实验验证, 找到了内部封装长度和偏位的控制方法。当前激光器厂商一般通过控制封装内部的原材料高度, 通过压缩公差, 来达到同轴器件长度的控制, 成本较高。在偏位控制上, 通过控制激光器芯片贴装的位置进行控制, 忽略了反射片的作用, 封装完成后成品率不高, 最后往往对每支产品的长度和偏位进行筛选测试, 工时浪费严重。本文改变带制冷同轴半导体激光器封装的惯性思维方式, 从众多因素中创新性的提出通过改变反

射片位置同时达到长度和偏位的控制,并通过仿真得到验证,对带制冷同轴半导体激光器实际批量生产具有指导意义,不仅可提升激光器的耦合效率,并较大幅度的降低成本和提升生产效率。

参 考 文 献:

- [1] 程尧. 同轴封装带制冷 10Gb/s 电吸收调制激光器的研究 [D]. 武汉邮电科学研究院, 2020. DOI:10. 27386/d. cnki. gwyky. 2020. 000055.
CHENG Y. *Research on Coaxial Packaged Cooled 10 Gbit/s Electro-absorption Modulated Laser* [D]. *Wuhan research institute of posts and telecommunic*, 2020. DOI:10. 27386/d. cnki. gwyky. 2020. 000055. (in Chinese)
- [2] 王元仕, 郭婷婷, 李伟, 等. 提升 TO 型光器件封装系统工艺质量的方法 [J]. *电子工艺技术*, 2022, 43(03): 169-171+177. DOI:10. 14176/j. issn. 1001-3474. 2022. 03. 013.
WANG Y S, GUO T T, LI W, *et al.* Methods to Improve Process Quality of TO Optical Device Packaging System [J]. *Electronics Process Technology*, 2022, 43(03): 169-171+177. DOI:10. 14176/j. issn. 1001-3474. 2022. 03. 013. (in Chinese)
- [3] SHAKER LINA M, OSAMAH SARA, AMIERY AHMED AAL. Single-mode optical fibers coupling: Study of the field of view [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1045(1).
- [4] SU Q, HIKIMA D, ISHII T, *et al.* Optimization analysis for high-efficiency optical coupling between polymer waveguide and single mode fiber using 45° mirror and self-formed lenses [C] *JSAP Annual Meetings Extended Abstracts The 67th JSAP Spring Meeting 2020. The Japan Society of Applied Physics*, 2020: 1169-1169.
- [5] 刘勇, 吴振刚, 周雷, 等. 高速半导体激光器同轴封装结构参数分析 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2015, 10(04): 350-354+366.
LIU Y, WU Z G, ZHOU L, *et al.* Analysis of Structure Parameters of the Coaxial Package with High-Speed Semiconductor Lasers [J]. *Journal of CAEIT*, 2015, 10(04): 350-354+366. (in Chinese)
- [6] 谭科民, 柴飞跃, 黄长统, 等. 半导体激光器高速同轴封装设计 [J]. *半导体技术*, 2011, 36(07): 566-569.
TAN K M, CHAI G Y, HUANG C T, *et al.* Design of High-Speed Semiconductor Lasers with Coaxial Package [J]. *Semiconductor Technology*, 2011, 36(07): 566-569. (in Chinese)
- [7] 卢胜强. 同轴型半导体激光器封装的耦合模型与规律研究 [D]. 中南大学, 2014.
LU S Q. *Research on Coupling Models and Rules for Coaxial Laser Diode Packaging* [D]. *Central South University*, 2014. (in Chinese)
- [8] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [9] LU S, YAN Y, JIN G, *et al.* Diffractive optical element for coupling semiconductor laser diode to single-mode fiber [P]. *SPIE OPTO*, 2003.
- [10] ARISA S, TAKAYAMA Y, ENDO H, *et al.* Coupling efficiency of laser beam to multimode fiber for free space optical communication [P]. *International Conference on Space Optics*, 2017.
- [11] 陈海涛, 杨华军, 黄小平, 等. 基于非球面透镜的光纤耦合系统设计 [J]. *激光与红外*, 2013, 43(01): 76-78.
CHEN H T, YANG H J, HUANG X P, *et al.* Design of optical fiber coupling system with an aspherical lens [J]. *LASER & INFRARED*, 2013, 43(01): 76-78. (in Chinese)
- [12] 王宇华, 李志华, 段发阶, 等. 光纤耦合效率与接收光强计算研究 [J]. *光电工程*, 2005, (07): 42-44+58.
WANG Y H, LI Z H, DUAN F J, *et al.* Research on coupling factor and receiving power of optical fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, (07): 42-44+58. (in Chinese)
- [13] LU S, ZHANG F, XU C, *et al.* Coupling efficiency of a laser diode to a single-mode fiber via a microlens on the fiber tip [J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68.
- [14] 肖志刚, 李斌成. 高斯光束到光纤的单透镜耦合 [J]. *光电工程*, 2008(08): 29-34.
XIAO Z G, LI B C. Single-lens Coupling Efficiency of a Fundamental Gaussian Beam to an Optical Fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008(08): 29-34. (in Chinese)
- [15] 刘勇, 李锦华, 周雷, 等. 高速半导体激光器同轴封装工艺误差分析 [J]. *中国电子科学研究院学报*, 2015, 10(06): 652- 656+661.

LIU Y, LI J H, ZHOU L, *et al.* Analysis of Coaxial Package Errors with High-Speed Semiconductor Lasers [J]. *Journal of CAEIT*, 2015, 10(06):652-656+661. (in Chinese)



张彩(1981-),女,河北安新人,硕士研究生,讲师,高级工程师,2009年于大连理工大学获得硕士学位,半导体激光器件设计与封装方向。E-mail: zhangcai@neusoft.edu.cn



王晴晴(2000-),女,河北雄县人,学士,2022年本科毕业于湖南科技大学,工程师,光学设计方向。E-mail: yoghurt0314@163.com



刘佳尧(2000-),男,河北承德人,中国科学院半导体研究所硕士研究生在读,半导体激光器芯片设计方向。E-mail: Jiayao_Liu@outlook.com