光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023102302

铌酸锂 M-Z 电光强度调制器光辐射模研究

郑帅峰*，刘佰畅，田自君，李淼淼，华　勇
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 铌酸锂马赫-曾德尔(M-Z)电光强度调制器光辐射模与光纤耦合是导致芯片与光纤组件耦合失效的主要原因。采用光纤与芯片高精度耦合扫描法对光波导和光辐射模进行扫描，研究了光辐射模中心位置分布、光辐射模输出光功率随偏置电压的变化特性，以及光辐射模、光波导与光纤耦合光能量的分布特性。测得光波导在 X，Y 方向的有效耦合范围分别为 14～15.5 μm 和 14～16 μm，光辐射模在 X，Y 方向的有效耦合范围分别为 89～92 μm 和 92～96 μm。根据所研究的光辐射模特性，制定了失效耦合的解决方案，解决了光辐射模耦合失效问题。

关键词： 铌酸锂电光强度调制器；马赫-曾德尔光波导；光辐射模；耦合失效；高精度耦合
中图分类号： TN256；TN761　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0074－05

Study on the Radiation-Mode Light of the Lithium Niobate Electric-optical Intensity Modulator with M-Z Optical Waveguide

ZHENG Shuaifeng，LIU Baichang，TIAN Zijun，LI Miaomiao，HUA Yong
（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： The radiation-mode light radiated from an M-Z optical waveguide may couple with the fiber，and this is the main factor leading to failure of the high-precision coupling between a chip and the fiber array. This study used fiber to scan the waveguide and radiation-mode light with a high-precision coupling method and studied the center position of the radiation-mode light regions，the characteristics of the radiation-mode light power that changed with the bias voltage，and the power distribution characteristics of the waveguide and radiation-mode light scanned by the fiber. The effective coupling ranges of the waveguide in the X and Y directions were 14～15.5 and 14～16 μm，respectively，and the effective coupling ranges of the radiation-mode light in the X and Y directions were 89～92 and 92～96 μm，respectively. The study investigated the characteristics of the radiation-mode light to formulate the correct solution and solve the coupling failure caused by radiation-mode light.

Key words： lithium niobate electric-optical intensity modulator；M-Z optical waveguide；radiation modes light；coupling failure；high-precision coupling

0　引言

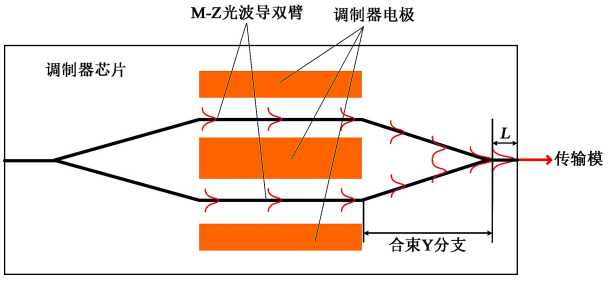
铌酸锂马赫-曾德尔(M-Z)电光强度调制器利用铌酸锂的电光效应对 M-Z 结构光波导两臂的相干光进行相位调制，经干涉合束在输出端实现光强度调制，进而实现电信号对光波的调制。其输出端光功率由干涉合束时两相干光的光程差决定，当两束相干光干涉相消时，在光波导两侧区域产生光能量较集中的光辐射模。光纤与 M-Z 电光强度调制器芯片耦合时，光辐射模会误导光纤与其进行耦合，

收稿日期：2023－10－23.
基金项目：国家重点研发计划项目(2020YFC2200300).
* **通信作者：**郑帅峰

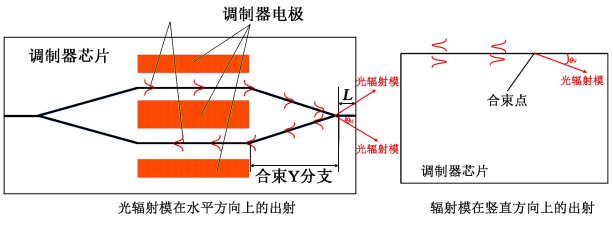
使得光纤与芯片波导耦合位置完全偏离，从而导致光辐射模耦合失效。本文采用光纤与芯片高精度耦合扫描法，对铌酸锂 M-Z 电光强度调制器光辐射模进行研究测试，解决了铌酸锂 M-Z 电光强度调制器高精度耦合中光辐射模导致的耦合失效问题。

1　光辐射模的产生

在铌酸锂 M-Z 电光调制器的光波导结构中，两相干光分别经 Mach-Zehnder 两臂光波导的相位调制后，在合束 Y 分支端合束干涉，两相干光具有相位差 δ，当 $\delta=2n\pi$ 时，传输基模在合束 Y 分支产生并经输出直波导传输到芯片端面，即 M-Z 电光调制器处于干涉相长状态；当 $\delta\neq 2n\pi$ 时，高阶模在合束 Y 分支产生，但其不能在输出直波导中传输，因此辐射出输出端直波导形成光辐射模，当 $\delta=(2n+1)\pi$ 时，M-Z 电光调制器处于干涉相消状态，输出端光辐射模能量达到最大，如图 1 所示。



(a) 干涉相长时两相干光相位差



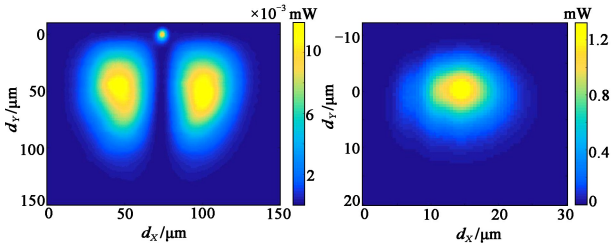
(b) 干涉相消时两相干光相位差

图 1　M-Z 结构合束点光辐射模产生示意图

2　光辐射模、光波导与光纤耦合光能量分布

高速铌酸锂 M-Z 电光强度调制器芯片在干涉相消和干涉相长状态下分别与光纤耦合，在不同对准位置下光纤尾纤有对应光功率输出，即可形成光辐射模、光波导与光纤耦合光能量分布图。

采用可编程控制的高精密六维位移平台夹持光纤进行扫描，其位移精度为 ±20 nm，双向移动可重复精度为 0.1 μm。光纤对光辐射模的扫描间距为 1 μm，扫描范围为 300 μm×162 μm，光纤对光波导区域扫描间距为 0.5 μm，扫描范围为 30 μm×32 μm，当扫描的原点为干涉相长时，则达到光波导与光纤的最佳耦合位置（即耦合光纤输出光功率最大的位置）。测得光波导和光辐射模与光纤分别耦合光能量分布如图 2 所示。



(a) 干涉相消状态　　(b) 干涉相长状态

图 2　光波导和光辐射模与光纤耦合光能量分布

通过在偏置电极端施加偏置电压改变 M-Z 两臂的光程差，使 M-Z 光波导芯片稳定工作在干涉相消或干涉相长状态。测试输入光功率为 5.5 mW，光纤在光波导最佳耦合位置输出最大光功率为 1.32 mW，在区域 1（左侧）和区域 2（右侧）的光辐射模耦合最大光功率均为 11.9 μW。输出光纤在光波导区域耦合损耗为 3.2 dB，在两个光辐射模区域的耦合损耗均为 23.6 dB，即光辐射模耦合区域、光波导与光纤耦合损耗差值为 20.4 dB。经不同铌酸锂 M-Z 强度调制光波导芯片多次测试，其差值均值为 21.0 dB。

2.1　光辐射模耦合的中心位置分析

本文以高速铌酸锂 M-Z 电光强度调制器为研究对象，其扩散型光波导采用质子交换工艺制作。如图 1 所示，其输出 Y 分支到芯片输出端面的距离 $L=3\,500$ μm，其光辐射模中心与输出直波导在水平方向上的间距 $D_H=L\sin\theta_H$；在竖直方向上的间距 $D_V=L\sin\theta_V$；两者的间距 $D=\sqrt{D_H^2+D_V^2}$。

测试系统以干涉相长时光波导与光纤的最佳耦合位置为原点，光辐射模耦合的中心位置与光波导最佳耦合的相对位置即是与测试原点的相对位置。如图 3 所示，区域 1（左侧）光辐射模耦合中心位置与光波导最佳耦合位置相距 72.8 μm，在 X 方向上相距 58 μm，在 Y 方向上相距 44 μm，即区域 1 中光辐射模在水平方向上的辐射角度 $\theta_H=0.95°$，在竖直方向上的辐射角度 $\theta_V=0.72°$；区域 2（右侧）光辐射模耦合中心位置与光波导最佳耦合位置相距 73.6 μm，在 X 方向上相距 54 μm，在 Y 方向上相距

50 μm，即区域 2 中光辐射模在水平方向上的辐射角度 $\theta_H = 0.88°$，在竖直方向上的辐射角度 $\theta_V = 0.82°$。

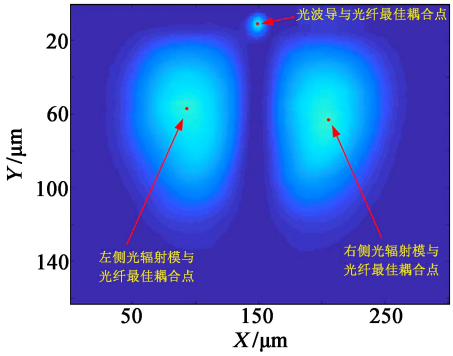


图 3 光辐射模耦合中心点与光波导最佳耦合点的相对位置关系

当铌酸锂 M-Z 电光强度调制器与光纤组件进行高精度耦合时，若出现光纤与光辐射模耦合位置时，则可利用光辐射模与光波导中心的相对位置，为耦合系统提供光纤的纠偏位移，以使光纤与光波导耦合在正确的相对位置附近。

2.2 光波导、光辐射模与光纤耦合输出光功率随电压变化

对铌酸锂 M-Z 电光强度调制器的调制电极或偏置电极施加调制电压或偏置电压，可改变两合束相干光的光程差，进而在合束端形成输出光功率的相位差变化，光波导输出光功率 P_W 与光辐射模输出光功率 P_R 分别为：

$$P_W = \frac{[1+\cos(\phi+\phi_{bias}+\varphi)]}{2} P_{W0} \quad (1)$$

$$P_R = \frac{[1+\cos(\phi+\phi_{bias}+\varphi+\pi)]}{2} P_{R0} \quad (2)$$

式中，P_{W0} 为光纤与光波导耦合时光纤输出光功率的最大值，P_{R0} 为光纤耦合光辐射模输出光功率最大值，ϕ 为调制电压信号引起的相位变化，ϕ_{bias} 为直流偏置电压引起的相位变化，φ 为 M-Z 光波导结构中两臂的不对称性导致的相位差。

由于光辐射模是由合束点两束相干光产生的高阶模，因此光波导输出光功率 P_W 与光辐射模输出光功率 P_R 间具有 π 的相位差，即 P_R 与 P_W 反相。当 P_R 值最大时，P_W 最小，M-Z 强度调制器处于干涉相长状态；当 P_R 值最小时，P_W 最大，M-Z 强度调制器处于干涉相消状态。

分别在光纤与光辐射模、光波导耦合时，对偏置电极进行电压扫描，由所得光波导、光辐射模与光纤耦合输出光功率随电压变化曲线可知，光纤所耦合光辐射模随电压变化，并且与光波导区域耦合的输出光功率随电压变化曲线具有 π 的相位差，如图 4 所示，这与理论分析结果吻合。

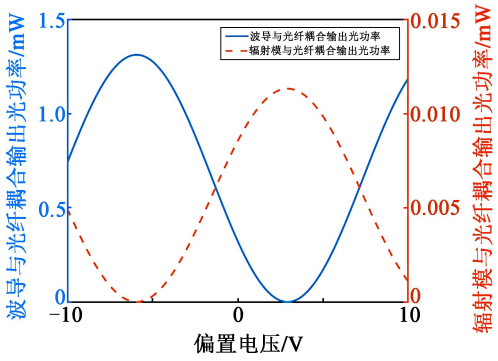
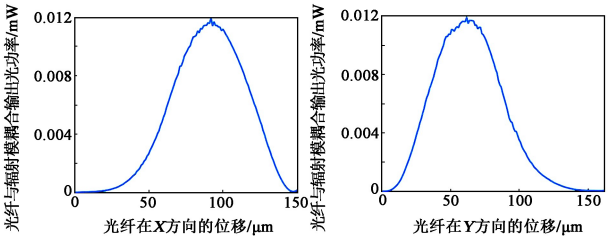


图 4 光波导、光辐射模与光纤耦合输出光功率随电压变化曲线

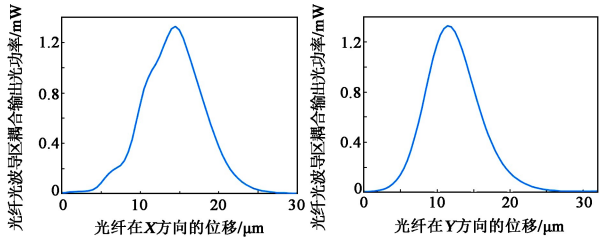
若输入光未被约束在光波导内，输入输出光纤仅为空间光耦合对准，则输出光功率不随偏置电压改变而变化。因此可采用在偏置端进行电压扫描的方式来判断光纤是否与光波导或光辐射模发生耦合，以排除两光纤在非光波导约束情况下的空间光耦合情况。

2.3 光波导、光辐射模分别与光纤耦合的特征识别

由图 5(a)和图 5(b)可知，光辐射模区域面积大于光波导区域面积，因此可利用光纤在 X 或 Y 方向对光辐射模区域和光波导区域进行有效耦合区域扫描并提取相应特征，用以判断光纤是否耦合在正确的光波导区域。



(a) 光辐射模沿 X 轴　(b) 光辐射模沿 Y 轴



(c) 光波导区沿 X 轴　(d) 光波导区沿 Y 轴

图 5 光辐射模和光波导区沿 X、Y 轴与光纤耦合输出光能量分布

根据光辐射模与光波导光能量分布试验数据，光辐射模、光波导分别与光纤耦合沿 X 轴的相应能量分布如图 5(a)、(c)所示，沿 Y 轴的相应能量分布如图 5(b)、(d)所示。

分别以在光辐射模、光波导与光纤耦合的输出最大光功率的 $1/e^2$ 作为截止光功率计算其各自的有效耦合区域范围。光辐射模与光纤耦合在 X 方向上的有效耦合区域范围为 90 μm，在 Y 方向上的有效耦合区域范围为 93 μm；光波导与光纤耦合在 X 方向上的有效耦合区域范围为 15 μm，在 Y 方向上的有效耦合区域范围为 14 μm。用 60 片不同铌酸锂 M-Z 强度调制光波导芯片进行相同测试，得到其有效耦合区域范围，如表 1 所示。

表 1　光辐射模、光波导在 *X*,*Y* 方向上的有效耦合区域范围

模场区域	X 方向有效耦合区域范围/μm	Y 方向有效耦合区域范围/μm
光辐射模	89～92	92～96
光波导	14～15.5	14～16

由光辐射模、光波导在 X、Y 方向上与光纤进行耦合的有效耦合区域范围可知，光波导在两方向上与光纤耦合的有效耦合区域范围大小不超过 20 μm，光辐射模有效耦合区域范围大小远大于 20 μm，因此在耦合工艺中可将有效耦合区域范围大小 20 μm作为光纤耦合在光辐射模区域或光波导区域的判断标准。

3　光辐射模失效耦合的解决方案

当耦合完成输入、输出光纤与芯片光波导初步对准后，若此时损耗大于等于 20 dB，则可判定为初步对准耦合失效，而不能进行后续高精度耦合工艺。

初步对准耦合失效后，需进行偏置电极端－10 V～＋10 V 电压扫描，若光纤耦合在芯片光波导区域或者光辐射模区域，则输出光功率会随施加扫描电压而有规律地变化，反之则认为光纤未耦合在以上两个区域，需进行光纤的初始位置修正。

若光纤与芯片光波导或者光辐射模耦合，则利用光纤在 $X(Y)$ 方向上对耦合区域进行有效耦合区域扫描。若有效耦合区域范围小于等于 20 μm，则光纤与光波导耦合，此时调整偏置电极的偏压使输出光功率达到最大，即可进行后续高精度耦合工艺；若有效耦合区域范围大于 20 μm，则光纤与光辐射模耦合，此时调整偏置电极的偏压使输出光功率达到最小，并按照两光辐射模耦合中心点与光波导最佳耦合点的位置关系移动光纤到光波导最佳耦合点的位置，当耦合损耗小于等于 20 dB，即可进行后续高精度耦合工艺。

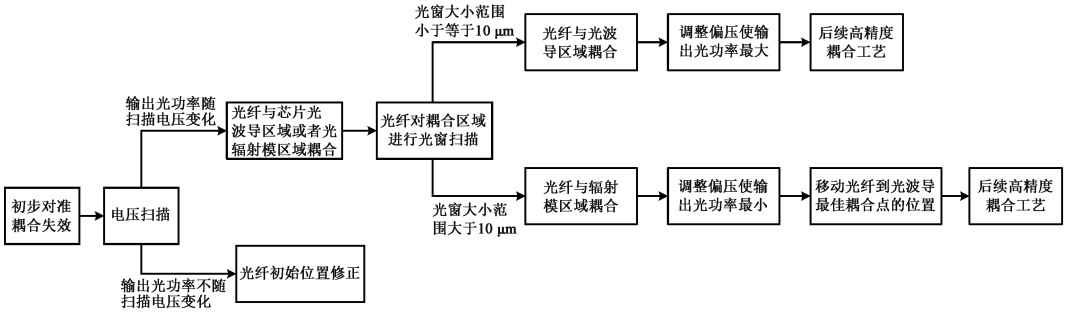


图 6　光辐射模失效耦合解决方案

4　结论

在高精度耦合技术中，由于偏置电压设置不合理，使光辐射模区域存在较大光功率输出，进而诱导的光纤与其对准耦合是导致耦合失效的主要原因。本文对铌酸锂 M-Z 强度调制器光辐射模中心位置分布、光辐射模输出光功率随偏置电压变化特性，以及光辐射模、光波导与光纤耦合光能量分布特性展开研究，并在高精度耦合中采用光辐射模失效耦合解决方案，解决了因光辐射模产生的耦合失效。

参考文献：

[1] Rao A, Fathpour S. Compact lithium niobate electrooptic modulators[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electron., 2018, 24(4): 1-14.

[2] Christian K, Hauke C, Moritz K, et al. Fiber-coupled plug-and-play heralded single photon source based on Ti∶$LiNbO_3$ and polymer technology[J]. Opt. Express, 2023, 31(14): 22685-22697.

[3] Sun S, Xu M, He M, et al. Folded heterogeneous silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators with low drive voltage[J]. Micromachines, 2021, 12(7): 823.

[4] Parfenov M, Tronev A, Ilichev I, et al. Precise correction of integrated optical power splitters based on lithium niobate

substrates by photorefractive effect local excitation[J]. Appl. Phys., 2020, B126(5): 1-8.

[5] 李淼淼，胡红坤，陆锦东，等. 交叉耦合效应对M-Z调制器谐波抑制比的影响[J]. 半导体光电，2022，43(6)：1109-1113.
Li Miaomiao, Hu Hongkun, Lu Jindong, et al. Influence of cross coupling effect on harmonic suppression ratio of M-Z modulator[J]. Semiconductor Optoelectonic, 2022, 43(6): 1109-1113.

[6] Wang C, Zhang M, Stern B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Opt. Express, 2018, 26: 1547-1555.

[7] Lee C, Cho S, Chun H. Investigation of frequency dependent nonlinearity on pulse amplitude modulation in bandlimited visible light communications[J]. Opt. Commun., 2020, 472(1): 126040.

[8] 周 勇，陆荣国，吕江泊，等. 基于S型Y分支波导的石墨烯M-Z电光调制器设计[J]. 半导体光电，2021，42(2)：179-184.
Zhou Yong, Lu Rongguo, Lv Jiangbo, et al. Design of graphene M-Z electro-optic modulater based on S-Y branch waveguide[J]. Semiconductor Optoelectonic, 2021, 42(2): 179-184.

作者简介：

郑帅峰(1989—)，男，重庆市人，硕士，工程师，主要从事集成光学器件研究。