

射频 CO₂ 激光陶瓷基板划片机光路设计及分析

侯廉平¹, 陈陪峰², 王 圩¹

(1. 中国科学院 半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083;

2. 华中科技大学 激光工程研究院, 湖北武汉 430074)

摘要: 介绍了RF CO₂ 激光陶瓷基板划片机的特点。分析了导光系统的设计原则, 着重讨论了圆偏振镜和伽利略离焦望远镜的作用和特点。对导光系统进行了优化和模拟, 给出了导光系统的光路图及成像质量图。试验结果和理论相符, 系统划片速度可达 10 m/min, 划缝宽度 < 0.1 mm, 划缝深度 > 0.3 mm。利用所设计的陶瓷划片机加工的氧化铝陶瓷基片可与国外同类划片机相媲美

关键词: 激光加工设备; 陶瓷基板; 划片机; 光路; 设计

中图分类号: TG665 文献标识码: A

Design of beam delivery system for RF CO₂ laser ceramic substrate scriber

HOU Liarr ping, CHEN Pei feng, WANG Wei

(1. *National Research Center for Optoelectronic Technology,
Institute of Semiconductor, Beijing 100083, China;*

2. *Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The current requirements for laser ceramic substrate scriber systems are high light beam quality, fast scribing velocity, narrow scribing groove, small heat affected zone, smooth cross-section, and independence of scribing quality from scribing direction. The light guide system designed can satisfy all the above-mentioned requirements, and it includes anamorphic lens, space filter, circular polarizer, Galileo defocusing telescope and focusing lens, and it has a scribing velocity of up to 10 m/min, a scribing width of less than 0.1 mm, and a scribing depth of more than 0.3 mm.

Key words: laser processing equipment; ceramic substrate; scriber; light paths; design

1 引言

射频激励封离式 CO₂ 激光陶瓷划片与传统的陶瓷划片相比具有如下优点^[1-5]: 属非接触式加工, 不存在刀具磨损, 无需更换刀具, 而且与被刻划材料的硬度完全无关, 划缝细、划缝速度快、

断面光滑、不损伤基板; 射频波可实现高频幅度调制, 可高频调制激光增益和激光输出, 调制频率最高可达 100 kHz; 输出高频方波脉冲, 具有高峰值功率; 光束质量好 ($M^2 < 1.3$); 激光器采用全封离式设计, 性能优越, 免维护, 系统的集成性好。为陶瓷加工开辟了一个全新的领域。

2 射频 CO₂ 激光陶瓷基板划片机系统

研制成功的国内第 1 台射频 CO₂ 激光陶瓷基板划片机系统包括激光器、导光系统、X-Y 二维工作台、控制系统、冷却系统、辅助吹气系统

等, 其结构框图见图 1, 其中激光器的主要性能指标如表 1 所示。各个系统都和陶瓷划片质量息息相关, 其中导光系统的设计尤为重要, 本文重点论述射频 CO₂ 激光陶瓷基板划片机导光系统的设计。

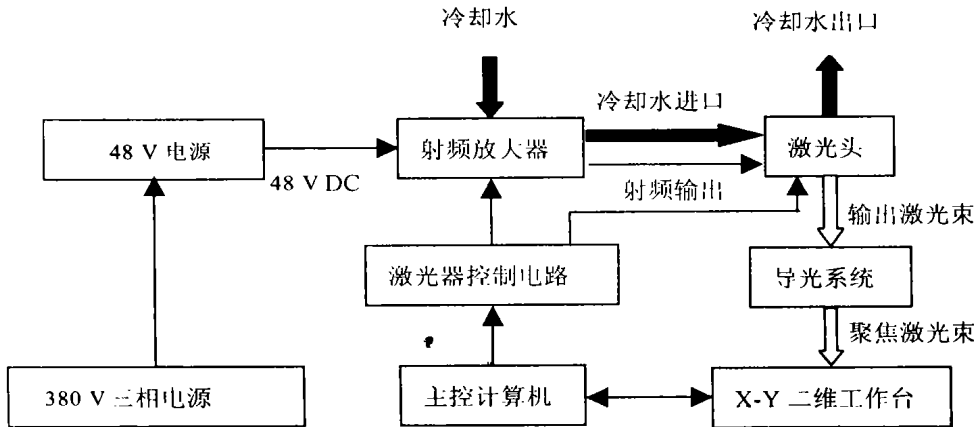


图 1 RF CO₂ 激光陶瓷划片机构成框图

Fig. 1 Structure of RF CO₂ ceramic substrate scriber

3 导光系统设计

导光系统负责将激光器输出的高质量激光束传送到陶瓷加工表面, 并尽可能地减少光束传输过程中的光束质量的降低。同时, 导光系统还能

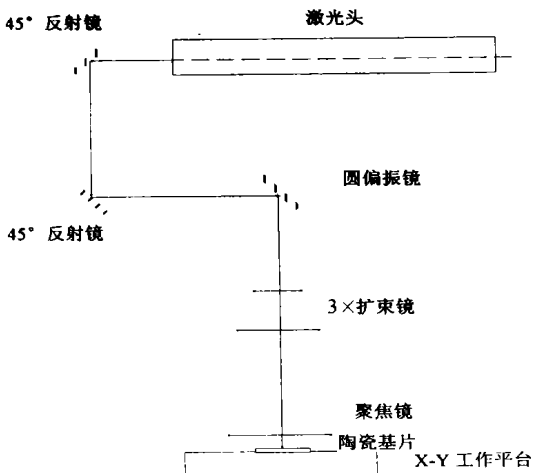


图 2 导光系统示意图

Fig. 2 Diagram of beam delivery system

够保护其本身和激光器免受从加工表面反射回来的激光损伤。设计的导光系统从激光器出口一直到激光加工头都是密封的, 并加吹气保护。光学元件上的污点会降低光束质量, 严重的甚至会永久性地破坏光学元件的表面。颗粒状物质强烈地吸收激光, 并把所吸收的热量传导到所附着的光学元件表面, 从而最终破坏颗粒物下面的膜层。镜片的损伤是不可挽回且无法补救的。设计的导光系统属固定光路系统, 见图 2。它包括整形镜(柱面镜)、空间滤波器、两个 45° 反射镜、圆偏振镜、3× 扩束镜、聚焦镜以及密封和保护系统。其中整形镜和空间滤波器已内装于激光头, 图中未画出来。之所以设计成这种结构是因为: (1) 激光器的输出光束是线偏振光, 而且偏振方向和激光器的安装底板平行, 而陶瓷加工需要圆偏振光, 因此必须把激光器绕 Z 轴旋转 45° 安装。加 2 个 45° 反射镜的目的为了缩短整个陶瓷划片机的外形尺寸。(2) 把 3× 扩束镜放到激光加工头的上面可以缩短导光系统的长度, 使功率传输损耗减少到最小, 系统更加紧凑。各个元件的功能如下: 柱面镜起整形作用, 使激光器输出的椭圆光

斑变成圆光斑; 空间滤波器滤去高阶模, 提高光束质量, 使激光器出来的激光束为准基模 ($M^2 < 1.3$)。 (3) 圆偏振镜可使线偏振光变成圆偏振光, 消除划片方向对划片质量的影响。 (4) $3\times$ 扩束镜可减小光束发散角, 增加激光束的准

直距离, 减小聚焦光斑半径, 提高功率密度; 激光通过聚焦可以聚成能量密度很高的小光斑, 以达到划片所需要的激光功率密度。下面着重对圆偏振镜和扩束镜进行讨论。

表 1 激光器性能

Tab. 1 Laser specification^[9]

性能参数	规格	性能参数	规格
输出功率	250 W	功率稳定性	< $\pm 8\%$
M^2	< 1.3 ($K > 0.07$)	光束指向稳定性	< 200 μ rad
功率范围	10~ 250 W	光束椭圆度	< 1.2:1
脉冲频率	0~ 100 kHz	光束直径 ($1/e^2$)	6.8 \pm 0.5 mm
有效峰值功率	200~ 750 W	光束发散角	2.1 \pm 0.3 mrad
脉冲能量范围	10~ 500 mJ	波长	10.6 \pm 0.2 μ m
脉冲上升和下降时间	< 60 μ s	光束偏振	线性 > 100:1

3. 1 圆偏振镜

由于激光器输出光束是平行于底板的线偏振光, 而偏振平面和切割方向对割缝形状的影响见图 3^[7]。图 3 (a) 表示当切割方向与偏振光平面重合时, 切割缝窄而垂直, 切割面整洁。图 3 (c) 表示当切割方向与偏振光平面垂直时, 切割缝宽, 切割面上的割痕凹凸不平。图 3 (b) 表示切割方向与偏振光平面成 45° 夹角时, 割缝容易倾斜。

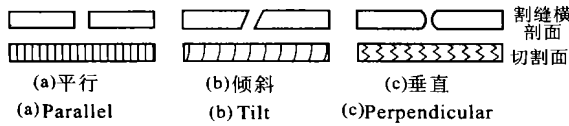


图 3 偏振平面和切割方向对割缝形状的影响

Fig. 3 Influence on incision figure by polarized plane and incision direction

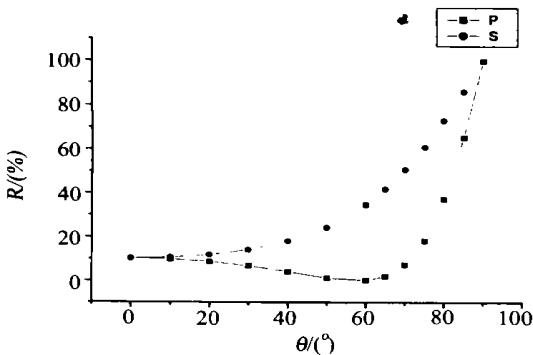


图 4 氧化铝陶瓷基片的反射率随入射角的变化 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)

Fig. 4 Reflectance curves at different angle of incidence ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$)

上述切割现象是由于激光相对切割方向偏转导致反射率不同而引起的。通过计算可得到当波长为 10.6 μm , 氧化铝陶瓷在不同的入射角时对 S 波和 P 波的反射率 (见图 4)。直线偏振光的偏振平面的方向总是不变的, 所以切割方向一变化, 切割方向与偏振平面或是同向或是垂直, 切割情况从而变化。相反, 圆偏振光的偏振平面总是变化的, 即使切割方向变化也对它没有影响。

为了消除偏振光对加工过程的影响, 必须在导光系统中加上一个圆偏振镜, 将激光器输出的线偏振光转换为圆偏振光。如图 5 所示。

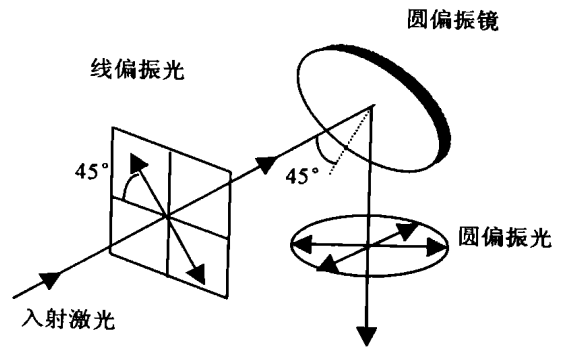


图 5 圆偏振镜将线偏振光转换为圆偏振光

Fig. 5 Operating principles of circular polarizer

圆偏振镜表面有特种双折射镀膜 (氟化钪或氟化钡)。线偏振光以 45° 入射角入射圆偏振镜, 偏振方向与入射面也成 45° 角。这样, 入射线偏振光可以分解为两个幅度相等、偏振方向互相垂直的线偏振光: 平行于入射面的线偏振光和垂直

于入射面的线偏振光。圆偏振镜对这两束线偏振光具有相同的反射率和不同的相移角, 二者的相移角之差为 90° 。经圆偏振镜反射的这两束线偏振光合成为圆偏振光, 光波电矢量幅值不变, 以光波频率绕传播方向旋转。在各个方向, 光波的性质和作用都是相同的, 不会造成激光在 X 轴和 Y 轴方向加工的差异性。上述原理已被实验所证明。

3. 2 3× 扩束镜

虽然激光器发出的激光束的光束质量较好, $M^2 < 1.3$, 但未加扩束镜之前, 根本不能对氧化铝陶瓷进行划片。

采用倒置望远镜可对激光束进行光学变换, 降低光束的发散角, 并将激光束束腰位置变换到加工位置中心。对小功率的激光束, 传统的倒置望远镜的前后镜一般是正透镜, 亦称开普勒倒置望远镜系统。但对大功率的激光束, 倒置望远镜的前镜不宜采用正透镜, 因为倒置望远镜前镜的焦距比较短, 聚焦焦斑比较小, 在大功率的情况下, 容易引起人身安全事故, 还会引起空气击穿, 造成光束畸变, 光束质量变差。因此, 对大功率激光束, 倒置望远镜的前镜采用凹透镜, 后镜采用凸透镜, 其等效光路见图 6。这种扩束镜, 也称伽利略望远镜。与开普勒望远镜系统相比, 伽利略望远镜外形尺寸紧凑, 扩束物镜与聚焦镜之间的距离不受限制, 负目镜可对正物镜的像差进行补偿, 系统形式简单, 并且可避免正透镜会聚而引起的强光效应以及对目镜的破坏。

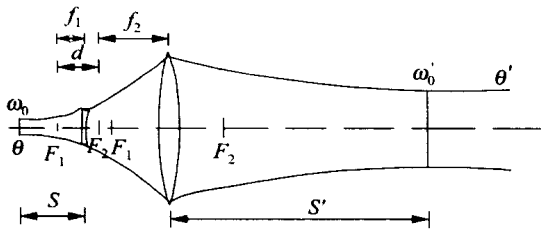


图 6 伽利略离焦望远镜系统

Fig. 6 Galileo defocusing telescopic system

使用重焦望远镜系统 ($d = 0$) 只能得到扩束比 (又称准直率):

$$M' = \frac{\omega_0'}{\omega_0} = |M_T|, \quad (1)$$

当 $S \gg f_1$ 时, 使用离焦望远镜系统 ($d \neq 0$) 可得

到最大扩束比及远场发散角之比为^[8]:

$$M'_{\max} \cong |M_T| \sqrt{1 + \left(\frac{S}{Z_0}\right)^2}, \quad (2)$$

$$\theta_0' \cong \frac{\theta_0}{|M_T| \sqrt{1 + \left(\frac{S}{Z_0}\right)^2}}, \quad (3)$$

其中 M_T 为望远镜系统的放大率 ($M_T = F_2/F_1$), $Z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$ 为物方瑞利半径。

由式 (1)、(2)、(3) 可知, 重焦望远镜系统的光束变换性能唯一地由望远镜系统的放大率所决定, 而离焦望远镜系统的扩束比不仅与望远镜系统放大率有关, 还依赖于系统的其他几何参数。因此, 重焦望远镜系统的应用是受到限制的, 也是比较死板的。而离焦望远镜系统的应用可以弥补望远镜系统放大倍率的不足, 更有效地利用物镜的口径。理论分析和实验表明, 满足变换要求的离焦量并不很大, 一般只有几十、乃至几百 μm , 最大也不过 mm 量级^[9]。由于光筒加工误差, 同时为了使光路调节的方便以及为了得到最大扩束比, 望远镜系统常常在离焦状态下工作。

实际设计时根据系统的综合考虑, 采用了 3 倍扩束伽利略离焦望远镜系统。

4 导光系统的优化及模拟

把上述光学元件的尺寸根据焦平面光斑及像差大小、调制传递函数 (MTF)、点扩散函数 (PSF)、波前图 (wavefront map) 等进行了优化。优化后的导光系统高斯光束的三维模拟见图 7, 焦平面的光斑尺寸大小及能量分布见图 8。由图 8 可知, 聚焦镜的焦平面处的光场分布是一组明暗交替的同心圆, 其中央为一亮斑。整个聚焦光斑的均方根半径约为 0.239 mm , 重心半径约为 0.448 mm , 而中央亮斑半径仅为 0.04 mm , 激光束的 84% 的能量都聚集在中央亮斑内, 因此要使划片宽度 $\leq 0.1 \text{ mm}$ 的设计指标是完全可以达到的。同时也证明导光系统的设计是合理的, 由图 9 (焦平面横断面光线扇形图) 可见, 在聚焦镜的焦平面处光束的横截面在半径为 0.239 mm 范围内, 光束的能量分布是很均匀的, 随着半径的增大, 能量分布就显得非常不均匀。

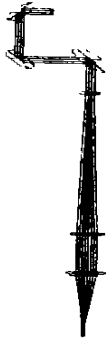


图 7 三维示图
Fig. 7 3D layout

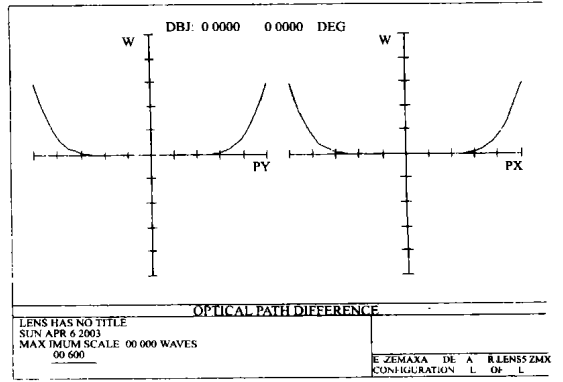


图 10 光程差图
Fig. 10 Optical path difference

由图 10 (焦平面光程差图) 可见, 在中央亮斑内的光程差很小, 而周围亮环的光程差逐渐增大。

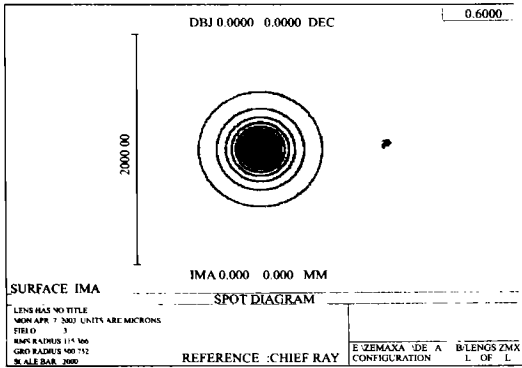


图 8 光斑图
Fig. 8 Spot diagram

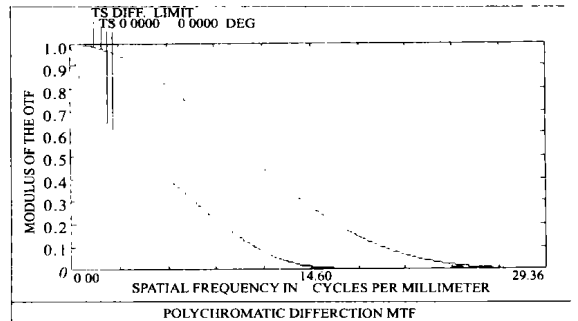


图 11 快速傅里叶变换调制传递函数
Fig. 11 FFT MTF

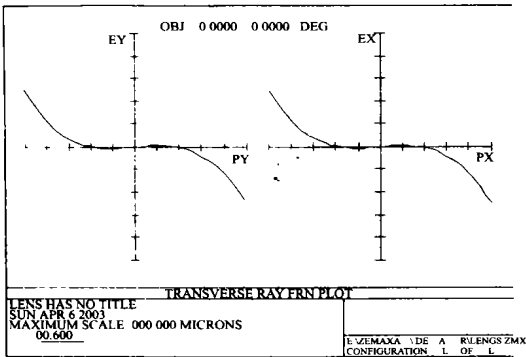


图 9 光线横向扇形图
Fig. 9 Transverse ray fan plot

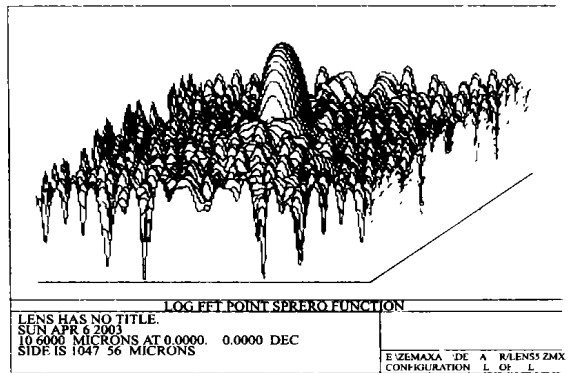


图 12 快速傅里叶变换点扩散函数
Fig. 12 FFT point spread function

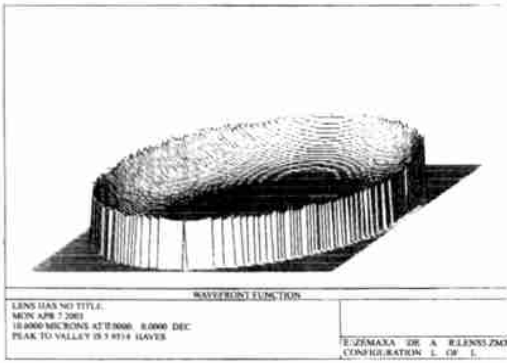


图 13 波前图

Fig. 13 Wavefront map

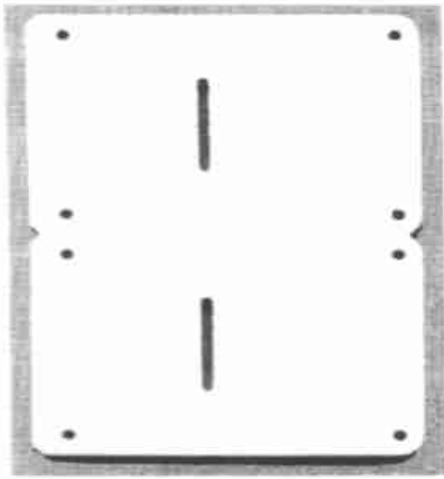


图 14 射频激光加工的陶瓷基板样品

Fig. 14 Processed samples of Al_2O_3 ceramic substrate by RF laser

图 11 为导光系统的调制传递函数, 图 12 为归一化的快速傅里叶点扩散函数, 图 13 为导光系统的波前图。由上述 3 个图可见, 本导光系统有较好的横向和纵向分辨能力, 成像质量很好。

5 结 论

通过试验, 其试验结果与理论分析完全符合。由于导光系统设计得比较好, 研制的射频 CO_2 激光陶瓷基板划片机具有如下优点: (1) 刻划速度快, 可达 10 m/min ; (2) 刻划的沟槽窄, 小于 0.1 mm ; (3) 热影响区小, 一般在 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 范围内, 工件变形小; (4) 断面光滑, 切口平行度好, 切口有棱角, 切边洁净, 一次成形, 无需 2 次加工; (5) 自动化程度高, 面板显示, 操作简单, 使用方便。可对复杂图案进行加工, 可加工出极小的圆角、极窄的线条或尖角; (6) 工艺成熟, 激光划片程序化; (7) 噪音低, 无公害。图 14 是用该划片机加工的氧化铝陶瓷基板样品, 其加工质量可与国外进口的陶瓷划片机相媲美。该划片机目前已大量生产和销售, 获得了良好的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] COLLEY A D, BAKER H J, HALL D R. Planar waveguide, 1 kW cw, carbon dioxide laser excited by a single transverse rf discharge [J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 61 (2): 136-138.
- [2] UDALOV Y B, TSKHAI S N, PETERS P J M, et al. Witeman RF excited gas lasers recent progress [C]. *Gas Laser Recent Developments and Future Prospects*, 1996, 5 (3): 73-88.
- [3] SPACHT D P, DEMARIA A J. The design of sealed CO_2 lasers continues to improve [J]. *Laser Focus World*, 2001, 6 (2): 123-127.
- [4] 浜崎正信, 陈敬之. 实用激光加工 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992, 192-193.
HASAKI, CHEN J ZH. *The practical laser processes* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1992, 192-193. (in Chinese)
- [5] 吕百达. 激光光学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992, 105-107.
LU B D. *Laser optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992, 105-107. (in Chinese)
- [6] 魏光辉, 朱宝亮. 激光束光学 [M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988, 201-202.
WEI G H, ZHU B L. *Laser beam optics* [M]. Beijing: Beijing Industry College Press, 1988, 201-202. (in Chinese)

作者简介: 侯廉平 (1969-), 男, 湖南安仁人, 博士, 1992 年毕业于中南工业大学机械系机械工程专业, 2003 年获物理电子学硕士学位, 现在中国科学院半导体研究所国家光电子工艺中心攻读博士, 主要研究方向为半导体光放大器 (SOA), 电吸收调制器 (EA) 以及模斑转换器 (SSC) 的集成。