

编码: 10384

密级

学号: 19920121152743

廈門大學

硕士学位论文

# 用于工业控制塑料光纤通信的光电集成接收芯片的研究

Research of Opto-electronic Integrated Receiver in  
Industrial Control for POF Communication

范程程

指导教师姓名: 程翔副教授

专业名称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2015 年 4 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期:

答辩委员会主席:

评阅人:

2015 年 4 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年月日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

(        )1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

(        )2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年月日

## 摘要

随着经济的飞速发展,传统的手工生产方式正逐步被自动化的生产方式取代。工人仅操作控制面板,将生产指令经传输媒介传达至自动化设备末端进行生产的方式是大势所趋。作为传输指令的载体,采用传统的铜线进行传输已无法确保数据完整性及工业精准度。符合“光进铜退”环保政策的新兴材料——塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)因具有优异的电磁抗扰性和易接续、低成本的特性,日渐广泛的应用在工业控制、车载网络、音频数据传输等各种短距离通信领域。工业控制中,POF 的使用可以隔离共模电压,抑制接地回路噪声和共模噪声,消除电火花产生的可能,从而在大噪声和高共模电压的环境下保证了设备的安全性和数据的完整性。

目前 POF 通信收发器普遍低频性能较差,灵敏度较低,成本较高,难以满足工业控制领域低速数据传输的大量需要。为了实现 POF 在工业控制领域中的应用,低速率 POF 收发芯片的开发必不可少。基于此,本文提出采用低成本的标准硅(Si)基 CMOS 工艺自主研发应用于低速工业控制领域的 650nm 单片集成光接收芯片 OEIC200 和 OEIC500 以适应不同速率工控环境的需要。

本文主要研究工作和成果包括以下方面:

(1) 应用 Silvaco 软件,基于 0.5 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺,对空间调制(Spatially Modulated, SM)光电探测器(Photodetector, PD)进行结构建模与仿真,并得到了优化的 PD 结构。采用华润上华科技有限公司(CSMC) 0.5 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺制备了该结构的 PD,测试了 PD 的特性。测试结果表明,反偏电压为 2.5V 时,PD 单位面积结电容为  $3.16 \times 10^{-4} \text{pF}/\mu\text{m}^2$ ,响应度 0.12A/W。

(2) 为了适应不同速率工控环境的需要,本文设计了工作频段为 1MHz~155MHz,集成了面积为  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  SM PD 的光接收芯片(OEIC200)。采用改进型可调节共源共栅(Regulated Cascode, RGC)跨阻放大器作为前置放大器,改进型 Cherry-Hooper 放大器作为限幅放大器, $f_T$  倍频器作为输出缓冲器,对各个单元及芯片整体进行了仿真。采用 CSMC 0.5 $\mu\text{m}$  CMOS 工艺制备了 OEIC200

并测试了芯片的特性。测试结果表明, 速率 155Mbps 且误码率小于  $10^{-9}$  时, OEIC200 芯片灵敏度可达-17.5dBm, 眼图较清晰。

(3) 设计了工作频段为 1KHz~1MHz, 集成了面积为  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  SM PD 的光接收芯片(OEIC500)。采用共源级负反馈跨阻放大器作为前置放大器, 并增加自动增益控制(Auto-gain Control, AGC)模块以增大芯片的动态范围。对芯片进行了封装并测试了芯片的特性, 结果表明, 速率低至 10Kbps 时, OEIC500 芯片可接收的最小光功率为  $30.2 \mu\text{W}$ 。自主搭建了低速 M 序列发生器, 并对其进行编码, 将编码后的信号作为 OEIC500 的输入进行测试, 测试结果显示 OEIC500 可以准确接收到该信号, 从而证明 OEIC500 实现了低速数据传输。

本文的创新点如下:

(1) 采用 Silvaco 软件基于 CMOS 工艺对 SM PD 进行建模, 仿真了 PD 的特性, 得到了优化的 PD 结构。

(2) 采用改进型 RGC 跨阻放大器作为 OEIC200 的前置放大器, 将威尔逊缓冲器运用到 RGC 电路中, 改善了前置放大器的性能。

(3) 采用标准 Si 基 CMOS 工艺制备了用于工业控制 POF 通信的单片集成接收芯片, 并对芯片进行了测试, 证明了芯片可以用于工业控制中低速数据的传输。

**关键词:** 塑料光纤通信工业控制光接收芯片

## Abstract

With the rapid economic development, traditional manual production is gradually replaced by the automation one, which means that production orders can be conveyed from the control system to automatic equipment through the communication medium. As a traditional communication medium, copper wires can't be able to ensure data integrity and industrial precision. As an ideal communication medium, plastic optical fiber (POF) is characterized by excellent electromagnetic immunity, convenient connection and low cost, therefore it has been widely used in various short distance communication areas, such as industrial control, vehicle network, audio data transmission and so on. In industrial control system, disturbances caused by common mode voltage, ground loop noise, common mode noise and electric spark can be avoided by using POF. As a result, the safety of equipment and data integrity are ensured in the environment with high noise and common mode voltage.

At present, the transceiver for POF communication is characterized by low frequency, low sensitivity and high cost, so it is hardly meet the needs of low data-rate communication in industrial control. In order to apply POF communication in the area of industrial control, it's essential to design low data-rate transceiver. In this paper, 650nm monolithic integrated optical receivers named OEIC200 and OEIC500 are implemented based on the standard silicon CMOS process with low cost to meet the different needs of industrial environment.

In this paper, the main work are as follows:

1. A structure model of Spatially Modulated (SM) photodetector (PD) is accomplished in Silvaco, and characteristics of PD are simulated on the model. Based on the simulation, SM PD is optimized and implemented in a standard 0.5 $\mu\text{m}$  CMOS process. Measured results indicate that the junction capacitance per unit of area is  $3.16 \times 10^{-4} \text{pF}/\mu\text{m}^2$  under 2.5V reverse voltage, and the responsivity is about 0.12A/W.
2. In order to meet different data rates of industrial environment, the monolithic

integrated receiver (OEIC200) with an optimized  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  SM PD is fabricated in  $0.5 \mu\text{m}$  CMOS process. Modified Regulated Cascode (RGC) trans-impedance amplifier is employed as a preamplifier, modified Cherry-Hooper amplifier is the limiting amplifier, and  $f_T$  frequency multiplier is the output buffer. Measured results indicate that its working frequency ranges from 1MHz to 155MHz, the sensitivity of receiver is about -17.5dBm at the data rate of 155Mbps and bit-error-rate (BER) less than  $10^{-9}$ . A cleareye diagram of OEIC200 is demonstrated for 155Mb/s.

3. The monolithic integrated receiver (OEIC500) with an optimized  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$  SM PD is fabricated. Common source trans-impedance amplifier with negative feedback is employed as a preamplifier, the dynamic range of OEIC500 is increased by adding Auto-gain Control (AGC) circuit. Measured results indicate that its working frequency ranges from 1KHz to 1MHz, the minimal detectable optical power of OEIC500 is  $30.2 \mu\text{W}$  at the data rate of 1Kbps. M sequence generator is designed and encoded as the input signal to do the experiment, it's shown by the result that the OEIC500 has been able to receive the signal accurately, proving that OEIC500 can be used in the low data-rate communication system.

The innovation points are as follows:

1. A structure model of SM PD is accomplished in Silvaco, and characteristics of PD are simulated on the model.

2. Modified RGC trans-impedance amplifier with Wilson Current Buffer (WCB) is employed as a preamplifier of OEIC200 to improve its performance.

3. 650nm monolithic integrated optical receivers are implemented based on the standard silicon CMOS process. Experimental results prove that optical receiver can be used in the low data-rate communication system.

**Keywords:** Plastic Optical Fiber (POF) communication; Industrial Control; Optical Receiver

中文摘要	I
英文摘要	III
第一章绪论	1
1.1 塑料光纤及其传输性能	1
1.2 塑料光纤通信在工控领域的现状与趋势	2
1.3 塑料光纤通信需攻克的核心技术	3
1.4 本文结构与内容安排	4
第二章用于工业控制的光接收芯片总体方案设计	6
2.1 光接收芯片总体设计	6
2.2 光接收芯片性能参数	7
2.3 光接收芯片设计指标	8
2.4 POF 通信光接收芯片的技术难点	9
2.5 本章小结	11
第三章基于硅基 CMOS 工艺的光电探测器设计与优化	12
3.1 光电探测器概述	12
3.2 光电探测器特性参数与性能要求	12
3.2.1 光电转换效率	13
3.2.2 频率响应	13
3.2.3 性能要求	14
3.3 SM 光电探测器	15
3.3.1 PN 光电探测器的工作机理	15
3.3.2 SM 光电探测器的工作原理	15
3.4 SM 光电探测器的建模与优化设计	17
3.4.1 SM 光电探测器的建模	17
3.4.2 改变工作-屏蔽二极管对数进行建模与仿真	19



3.4.3 改变 N-Well 宽度与间距进行建模与仿真 .....	21
3.5 本章小结 .....	23
<b>第四章光接收前端集成电路设计 .....</b>	<b>24</b>
4.1 跨阻前置放大器的设计 .....	24
4.1.1.改进型 RGC 跨阻放大器 .....	25
4.1.2 共源级负反馈跨阻放大器.....	32
4.2 限幅放大器 .....	38
4.2.1 理论分析与设计要点.....	38
4.2.2 改进型 Cherry-Hooper 放大器 .....	39
4.2.3 限幅放大器的仿真.....	42
4.3 输出缓冲器 .....	43
4.4 光接收芯片的仿真 .....	45
4.4.1 OEIC200 的仿真 .....	45
4.4.2 OEIC500 的仿真 .....	48
4.5 本章小结 .....	49
<b>第五章光接收芯片的版图设计 .....</b>	<b>50</b>
5.1 CMOS 集成电路版图设计流程 .....	50
5.2 版图设计规则 .....	51
5.2.1 版图设计的基本元器件.....	51
5.2.2 版图设计规则.....	52
5.2.3 版图设计注意事项.....	53
5.3 芯片版图绘制与验证 .....	54
5.3.1 芯片版图的绘制.....	54
5.3.2 DRC 验证 .....	56
5.3.3 LVS 验证 .....	57
5.4 光接收芯片的版图 .....	57
5.4.1 光电探测器版图.....	57
5.4.2 焊盘.....	58
5.4.3 单片集成光接收芯片版图.....	59
5.5 本章小结 .....	60

<b>第六章封装与测试</b> .....	61
<b>6.1 芯片的封装</b> .....	61
<b>6.2 SM 光电探测器的测试</b> .....	62
6.2.1 结电容特性测试.....	63
6.2.2 响应度和暗电流测试.....	64
6.2.3 光谱响应测试.....	65
<b>6.3 光接收芯片的测试</b> .....	67
6.3.1 直流工作点测试.....	67
6.3.2 瞬态特性测试.....	68
6.3.3 眼图测试.....	70
6.3.4 低频数据传输测试.....	72
6.3.5 灵敏度和动态输入范围测试.....	76
<b>6.4 本章小结</b> .....	77
<b>第七章结论与展望</b> .....	78
7.1 结论.....	78
7.2 展望.....	79
<b>参考文献</b> .....	80
<b>硕士期间的科研成果</b> .....	84
<b>致谢</b> .....	85

<b>Abstract in Chinese</b> .....	I
<b>Abstract in Chinese</b> .....	III
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
<b>1.1 POF and its communication character</b> .....	1
<b>1.2 Current status and the trend of POF in industrial control</b> .....	2
<b>1.3 The key technology of POF communication</b> .....	3
<b>1.4 Contents and structures of the thesis</b> .....	4
<b>Chapter 2 Design of optical receiver for POF in industrial control</b> .....	6
<b>2.1 Design of optical receiver</b> .....	6
<b>2.2 Parameters of optical receiver</b> .....	7
<b>2.3 Design index of optical receiver</b> .....	8
<b>2.4 Technical difficulties of optical receiver for POF</b> .....	9
<b>2.5 Conclusion</b> .....	11
<b>Chapter 3 Design and optimization of PD</b> .....	12
<b>3.1 Introduction of PD</b> .....	12
<b>3.2 Parameters and design index of PD</b> .....	12
3.2.1 Photoelectric conversion efficiency .....	13
3.2.2 Frequency response .....	13
3.2.3 Design indicators of PD .....	14
<b>3.3 Introduction of SM PD</b> .....	15
3.3.1 Working principle of PN PD .....	15
3.3.2 Working principle of SM PD .....	15
<b>3.4 Modeling and optimization of SM PD</b> .....	17
3.4.1 Modeling of SM PD .....	17
3.4.2 Modeling and Simulation with different pairs of $PD_{ref}$ - $PD_{real}$ .....	19
3.4.3 Modeling and Simulation with different sizes of N-Well .....	21

---

<b>3.5 Conclusion</b> .....	23
<b>Chapter 4 IC Design of optical receiver front-end</b> .....	24
<b>4.1 Design of trans-impedance preamplifier</b> .....	24
4.1.1 Modified RGC trans-impedance amplifier .....	25
4.1.2 Common source trans-impedance amplifier with negative feedback .....	32
<b>4.2 Design of limiting amplifier</b> .....	38
4.2.1 Theory and key points of design .....	38
4.2.2 Modified Cherry-Hooper amplifier .....	39
4.2.3 Simulation of limiting amplifier .....	42
<b>4.3 Design of output buffer</b> .....	43
<b>4.4 Simulation results of optical receiver</b> .....	45
4.4.1 Simulation of OEIC200 .....	45
4.4.2 Simulation of OEIC500 .....	48
<b>4.5 Conclusion</b> .....	49
<b>Chapter 5 Layout of optical receiver</b> .....	50
<b>5.1 Process of designing layout of integrated circuit</b> .....	50
<b>5.2 Principle of layout</b> .....	51
5.2.1 The basic components in layout .....	51
5.2.2 Principle of layout .....	52
5.2.3 Consideration of layout .....	53
<b>5.3 Drawing and validation of layout</b> .....	54
5.3.1 Drawing of layout .....	54
5.3.2 Verification of DRC .....	56
5.3.3 Verification of LVS .....	57
<b>5.4 Layout of optical receiver</b> .....	57
5.4.1 Layout of PD .....	57
5.4.2 Layout of pad .....	58
5.4.3 Layout of monolithic integrated optical receiver .....	59
<b>5.6 Conclusion</b> .....	60
<b>Chapter 6 Packaging and test of optical receiver</b> .....	61

---

<b>6.1 Packaging of optical receiver</b> .....	61
<b>6.2 Tests of SM PD</b> .....	62
6.2.1 Test junction capacitance .....	63
6.2.2 Test of responsivity and dark current .....	64
6.2.3 Test of spectrum response .....	65
<b>6.3 Tests of optical receiver</b> .....	67
6.3.1 Test of DC operating point.....	67
6.3.2 Test of transient character .....	68
6.3.3 Test of eye diagram .....	70
6.3.4 Test of transmission at low data-rate.....	72
6.3.5 Test of sensitivity and input dynamic range.....	76
<b>6.4 Conclusion</b> .....	77
<b>Chapter 7 Conclusion and prospect</b> .....	78
<b>7.1 Conclusion</b> .....	78
<b>7.2 Prospect</b> .....	79
<b>References</b> .....	80
<b>Publications</b> .....	84
<b>Acknowledgement</b> .....	85

## 第一章绪论

以光纤作为传输介质，以光信号作为载波的光纤通信系统具有超大的通信容量和较低的传输损耗，逐渐在通信领域占据了主导地位<sup>[1,2]</sup>。目前，光纤通信在主干网通信系统中的应用已经完善，在短距离通信系统中的应用日渐成为研究热点。塑料光纤(POF)因具备杰出的电气噪声免疫性、韧性好、孔径大、耐破坏（振动和绕曲）、保密性好、拉伸强度大、易安装和成本低等诸多优点，在交通、医疗、航天、传感、电力这些极为恶劣、复杂的工业环境中的应用日益广泛。

本章从 POF 的传输性能开始，介绍了 POF 通信在工业控制领域的现状与趋势以及需攻克的核心技术，论述了 650nm Si 基单片集成光接收芯片在 POF 通信中应用的可行性与重要价值，最后介绍了本文的主要内容及结构。

### 1.1 塑料光纤及其传输性能

POF 是指纤芯和包层均由透明的导光高分子聚合物材料构成的圆柱形线性导光纤维<sup>[3]</sup>，结构如图 1.1 所示。POF 具有两个显著特点：POF 由纤芯和位于纤芯外的包层组成，纤芯和包层是折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$  的两种同心均匀介质；POF 具有良好的柔韧性，便于施工安装和日常维护，可以制成较长的光缆，承担着传输光信号的任务。

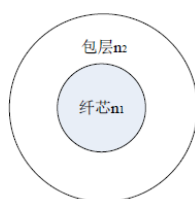


图1.1POF的剖面结构

与铜线相比，POF 采用可见光进行通信，所以用 POF 组成的通信网络可以避免各类应用的电磁干扰，也可以避免因雷击导致的设备损坏。相比石英光纤，POF 导光芯径相当大（100~1000 $\mu\text{m}$ ），使其不需要高精度定位器件进行连接，即使纤芯对准时有些许的偏差也不会对光耦合产生严重影响。另外，还允许使用注

塑连接器，从而大大地降低了连接成本。此外，POF 比石英光纤更加柔韧，便于施工安装和日常维护。因此，POF 作为新一代传输线缆，在短距离网络通信、工业控制领域都非常有优势<sup>[4]</sup>。

## 1.2 塑料光纤通信在工控领域的现状与趋势

国内外对于 POF 的研究与应用已有四十多年的历史，POF 起初用于照明，现已逐步广泛的用在网络通信、消费电子和传感器等领域，近年来在工业控制领域也取得了一定的进展<sup>[5]</sup>。

随着的经济飞速增长与信息化的高速发展，手工加工方式正在逐步被全自动化的加工方式取代。层出不穷的自动化设备以工人控制面板，将指令经传输载体传达至设备末端的方式大幅度提高了工厂的生产效率。由于现场各种自动化设备高速运转，产生了较强的电磁环境，因此曾经最普遍的传输载体——铜导线已无法保证信号传输的完整性及工业生产的精准度<sup>[6]</sup>。

因符合国家最新力推的“光进铜退”环保政策而著称的新兴光通信材料——POF 因其芯径大，抗干扰，防窃听，便于工业振动环境中数据的对接与传输；柔韧性好，可以在复杂的工业布线环境中穿梭自如。因此，POF 可作为工业控制总线系统、工业用监控系统、自动化测量系统以及风力发电、电力抄表等系统的传输媒介。随着工业制造技术的进步、工业自动化程度的提高，研制用于工业控制领域的 POF 通信系统将大有发展前景。

工业通讯级 POF 跳线与 650nm POF 光纤收发模组匹配使用，构成了较为可靠稳定、性价比较高的短距离通信网络，目前广泛应用在工业控制的现场总线方面。POF 短距离通信网络通过转换器，与 RS232、RS485、令牌网、千兆以太网等标准协议接口相连，在复杂、苛刻的工业环境中更安全、稳定的传输工业控制命令和信号，减小通信网络因电磁干扰而中断的可能性。

POF 同样是一种可用于风力发电领域的新型线缆，在野外恶劣的环境中提供稳定、工业用的数据传输系统，用于风力涡轮机监测控制系统的通信。

POF 可以用于电力抄表系统。目前由集中器至电力管理系统的上行主干网络已非常成熟，由于 POF 采集数据成功率高、实时性强、容量大，应用 POF 作为传输媒介的下行本地网（由用户至集中器）日渐成为研究热点。

与其他应用相比较，工业控制用 POF 收发芯片的工作速率范围需要覆盖从直流(DC)开始的低频段。车载网络、音频数据传输等应用的最低工作速率从 100Kbps 开始；工业用监控系统典型的传输速率为 10Kbps~1Mbps；自动化测量系统及电力抄表系统速率 1Kbps~100Kbps 即可满足需求；而目前用于工业控制现场总线的 POF 典型传输速率为 155Mbps。因此保证低频段的接收性能是工业控制用 POF 接收芯片的开发重点和难点。在发达国家，各领域专用的塑料光纤通信系统已普及，目前我国正走在传统金属电缆逐步被光纤替代的进程中。对于国内来说，结合工控环境的实际需要设计性能与之相符的 POF 接收芯片显得尤为重要。

### 1.3 塑料光纤通信需攻克的核心技术

POF 通信系统一般由光发射模块、POF 和光接收模块组成<sup>[7]</sup>。光发射模块由光源及其驱动电路组成，对来自电端机（如计算机、电话和视频设备等）的信号完成电到光的转换。光接收模块接收光信号实现光到电的转换并放大到合适的幅度。POF 通信系统发射和接收的光信号波长约为 650nm，这是由于波长为 650nm 的光信号在 POF 中传输时光功率衰减程度相对较小。

作为 POF 通信系统的核心之一，光接收模块由  $650\text{nm}\pm 17.8\text{nm}$  光电探测器 (Photodetector, PD) 和放大电路组成。目前，PD 和放大电路是分立状态，分立器件容易引入较多的互连线和较大的寄生电容、电感，从而降低了传输速率和可靠性，增加了噪声和封装复杂度，且主要元器件由国外进口，其成本相对较高，不利于 POF 通信的应用和普及<sup>[8]</sup>。随着微电子和光电子技术的迅速发展，Si 基光电集成电路(Opto-Electronic Integrated Circuits, OEIC)使 PD 和放大电路的单片集成成为可能。单片集成可以最大限度的消除寄生效应，提高器件的稳定性和可靠性，缩小器件的体积，降低成本，是实现 650nm 光接收芯片高性能、低成本的有效途径。

表 1-1 给出了近 5 年来国外 Si 基 650nm 光接收芯片的研究进展。可以看出，国外对于 650nm Si 基光接收芯片主要采用 18nm 及 18nm 以下 CMOS 工艺，虽然可实现较高的传输速率，但灵敏度并不理想。例如，加拿大 Dong Yunzhi 等人于 2010 年，基于 65nm CMOS 工艺制备了速率高至 3.125Gbps 混合集成的光接



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.